

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DO AMENDOIM**

( *Arachis hypogaea* L.) e MILHO-PIPOCA (*Zea mays* L.)

**POR**


**OSVALDIR DALBELLO**

Parcer

Este exemplar corresponde a redação  
final da dissertação de Mestrado  
defendida por Osvaldir Dalbello e  
aprovada pela Comissão Julgadora  
em 23 de junho de 1995. Campinas,  
04 de julho de 1995.

**ORIENTADOR:**

**Prof. Dr. JOÃO DOMINGOS BIAGI**

  
Presidente da Banca

Dissertação apresentada como cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Pré-Processamento de Produtos Agropecuários.

Campinas, SP

Junho de 1995

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	7/UNICAMP
	016E
V.	E.
1	254.86
PROD.	433.195
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	88.11.00
DATA	19/09/95
N.º CPD	

CM-00076452-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D15e Dalbello, Osvaldir  
Eficiência do processo de secagem do amendoim  
(*Arachis hypogaea* L.) e milho-pipoca (*Zea mays* L.) /  
Osvaldir Dalbello.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: João Domingos Biagi.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Secagem. 2. Amendoim. 3. \*Milho-pipoca. I.  
Biagi, João Domingos. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

---

Para minha família, Isaura, Aline e Pablo,  
pelo carinho, compreensão e dedicação  
dispensada.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor João Domingos Biagi, pela orientação clara e objetiva, pelo apoio e incentivo e pela amizade durante o transcorrer de todo o curso de mestrado.

Aos professores, Benedito Carlos Benedetti e Luiz Antonio Rossi, pela colaboração e orientação efetiva durante a realização dos trabalhos.

À EPAGRI, pelo apoio técnico e financeiro, e pela oportunidade ímpar recebida de aprendizado e desenvolvimento pessoal .

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

À todos os funcionários do campo experimental, e ao Dagoberto e Francisco do Laboratório de Secagem , que com seu trabalho facilitaram muito o desenvolvimento do experimento.

À Aninha, pelo apoio, colaboração e amizade.

À todos os amigos, colegas, e funcionários que com seu desprendimento e amizade, fizeram parte da nossa família, e, em especial à Conceição, que muito contribuiu, durante a realização dos trabalhos.

## SUMÁRIO

Página

PÁGINA DE ROSTO .....	i
DEDICATÓRIA .....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
SUMÁRIO .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. Objetivo geral .....	4
2.2. Objetivos específicos .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1. Caracterização dos produtos .....	5
3.1.1. Amendoim .....	5
3.1.2. Milho-pipoca.....	6
3.2. Princípios gerais de secagem .....	6
3.3. Métodos de secagem .....	8
3.3.1. Método natural.....	8
3.3.2. Método artificial .....	9
3.4. Desempenho dos secadores .....	11
3.4.1. Capacidade de secagem .....	11

3.4.2. Requerimento de energia .....	11
3.4.3. Combustíveis .....	13
3.4.3.1. Fornalhas .....	15
3.4.3.2. Energia elétrica .....	15
3.5. Parâmetros de secagem.....	15
3.6. Qualidade dos produtos .....	19
3.6.1. Amendoim .....	20
3.6.2. Milho-pipoca.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	24
4.1. Produtos .....	24
4.1.1. Amendoim .....	24
4.1.2. Milho-pipoca.....	25
4.2. Equipamentos .....	25
4.2.1. Secador.....	25
4.2.1.1. Sistema de circulação e aquecimento do ar.....	27
4.2.1.2. Intervalos de leitura .....	28
4.2.1.3. Temperatura e umidade do ar .....	28
4.2.1.4. Fluxo do ar.....	28
4.2.1.5. Umidade do produto .....	29
4.2.1.6. Utilização de energia .....	29
4.3. Qualidade dos produtos .....	32
4.3.1. Amendoim .....	32
4.3.2. Milho-pipoca.....	32
4.4. Procedimento experimental.....	33
4.5. Análise estatística .....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
5.1. Considerações gerais.....	35
5.2. Ventilador .....	35
5.3. Produtos .....	37
5.3.1. Amendoim .....	37
5.3.1.1. Condições ambientes e de trabalho, na secagem do amendoim.....	37

5.3.1.2. Secagem.....	41
5.3.1.2.1. Curvas de secagem.....	41
5.3.1.2.1.1. Período de resfriamento.....	42
5.3.1.2.2. Gradientes de temperatura e umidade .....	44
5.3.1.2.2.1. Gradiente de umidade .....	44
5.3.1.2.2.2. Gradiente de temperatura.....	46
5.3.1.2.3. Potencial de secagem.....	47
5.3.1.2.4. Taxa de secagem do amendoim.....	48
5.3.1.2.5. Período de secagem e funcionamento das resistências.....	49
5.3.1.2.6. Energia utilizada pelo ventilador .....	51
5.3.1.2.7. Eficiência do processo de secagem do amendoim .....	52
5.3.1.2.8. Custos da secagem.....	55
5.3.1.2.8.1. Combustíveis alternativos - biomassa, uma analogia com a energia elétrica .....	56
5.3.1.2.8.2. Custos de secagem do amendoim, considerando o produto seco.....	58
5.3.1.3. Qualidade do produto .....	61
5.3.1.3.1. Análise inicial, no recebimento .....	61
5.3.1.3.2. Qualidade do amendoim após a secagem.....	62
5.3.1.4. Conclusões referentes ao processo de secagem do amendoim.....	65
5.3.2. Milho-pipoca.....	67
5.3.2.1. Condições ambientes e de trabalho, na secagem do milho-pipoca .....	67
5.3.2.2. Secagem.....	68
5.3.2.2.1. Curvas de secagem.....	69
5.3.2.2.1.1. Resfriamento do produto .....	72
5.3.2.2.2. Gradientes de temperatura e umidade .....	73
5.3.2.2.2.1. Gradiente de umidade .....	73
5.3.2.2.2.2. Gradiente de temperatura.....	76
5.3.2.2.3. Potencial de secagem.....	77
5.3.2.2.4. Taxa de secagem.....	79
5.3.2.2.5. Período de secagem e funcionamento das resistências.....	80
5.3.2.2.6. Energia utilizada pelo ventilador.....	82

5.3.2.2.7. Eficiência do processo de secagem do milho-pipoca .....	84
5.3.2.2.8. Custos da secagem.....	86
5.3.2.2.8.1. Combustíveis alternativos - biomassa, uma analogia com a energia elétrica.....	89
5.3.2.2.8.2. Custos de secagem do milho-pipoca, considerando o produto seco.....	91
5.3.2.3. Qualidade do milho-pipoca.....	94
5.3.2.3.1. Grãos trincados .....	95
5.3.2.3.2. Capacidade de expansão do milho-pipoca.....	97
5.3.2.4. Conclusões referentes ao processo de secagem do milho-pipoca .....	101
6. CONCLUSÕES.....	103
7. SUMMARY .....	106
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108



## LISTA DE FIGURAS

Figura nº.	Assunto	Página
1	Esquema do secador com uma coluna de secagem.....	26
2	Visão geral do sistema de secagem .....	27
3	Instrumentos utilizados na indicação do uso da energia elétrica durante os testes experimentais.....	31
4	Curva característica do ventilador e faixa de trabalho .....	36
5	Curvas de secagem do amendoim com o tratamento 40/25/0,5 e umidade inicial de 18 % e 0,5 m de altura da camada. ....	43
6	Curvas de secagem do amendoim com o tratamento 40/25/1,0 e umidade inicial de 18,5 % e 1,0 m de altura da camada. ....	43
7	Relação entre as curvas médias de secagem e o gradiente de umidade com o amendoim, para os tratamentos 40/25/1,0 e 40/25/0,5; testes 20 e 22 da tabela 3. ....	45
8	Gradientes finais de temperatura e umidade na coluna de secagem, com o amendoim, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m, e teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 %. ....	46
9	Condições do ar de secagem na saída do secador, para alturas de camada de 0,5 e 1,0 m, com os tratamentos 40/25/1,0 e 40/25/0,5. ....	47
10	Taxa média de secagem do amendoim, kg/h de água retirada no processo de secagem, para teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e altura da camada de 0,5 e 1,0 m .....	49
11	Relação entre o período total de secagem e período em que as resistências permaneceram ligadas para os testes realizados com o amendoim.....	50

12	Relação entre a energia total requerida pelo sistema de secagem e a requerida pelo ventilador, por kg de água evaporada, com o amendoim, para alturas de camada de 0,5 e 1,0 m.....	52
13	Eficiência energética de secagem e eficiência do sistema de secagem com o amendoim, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m.....	53
14	Participação do ventilador em (%), nos custos totais, em 1000 kg de amendoim seco, para a energia elétrica, lenha e bagaço de cana, e alturas da camada de 0,5 e 1,0 m.....	60
15	Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 45/18/0,5, com umidade inicial de 16 %.....	70
16	Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/25/0,5, com umidade inicial de 22 %.....	70
17	Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/18/0,5, com umidade inicial de 16 %.....	71
18	Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/18/0,5, com umidade inicial de 22 %.....	71
19	Relação entre as curvas médias de secagem e o gradiente de umidade, para os tratamentos 60/25/0,5 e 45/18/0,5 e umidade inicial de 22 e 16 %, para o milho-pipoca.....	74
20	Gradiente final de umidade na coluna de secagem para teores de umidade iniciais de 22 e 16 %, 0,5 m de altura da camada, para o milho-pipoca.....	75
21	Gradiente final de temperatura na coluna de secagem do milho-pipoca para teores de umidade iniciais de 22 e 16 %, e 0,5 m de altura de camada ..	76
22	Condições do ar de secagem na saída do secador, para os tratamentos 60/25/0,5 e umidade inicial de 22 % e 45/18/0,5 com 16 % de umidade inicial, para o milho-pipoca.....	78
23	Taxa média de secagem do milho-pipoca, kg/h de água retirada no processo de secagem, com teores de umidade iniciais de 16 e 22 % e 0,5 m de altura da camada .....	79
24	Relação entre o período total de secagem e o período em que as resistências permaneceram ligadas, com tratamentos com 16 e 22 % de umidade iniciais, para o milho-pipoca .....	82

25	Relação entre a energia total requerida pelo sistema de secagem e a requerida pelo ventilador por kg de água evaporada, para os tratamentos nos teores de 16 e 22 % de umidade iniciais, para 0,5 m de altura de camada, com milho-pipoca.....	83
26	Eficiência energética de secagem e eficiência do sistema de secagem com teores de umidade iniciais de 16 e 22 %, e camada de 0,5 m, com o milho-pipoca.....	86
27	Participação do ventilador em (%), nos custos totais, em 1000 kg de milho-pipoca seco, para energia elétrica, lenha e bagaço de cana, umidade inicial de 22 % e altura de camada de 0,5 m.....	94
28	Valores médio de grãos trincados do milho-pipoca, na coluna de secagem, em função da temperatura e fluxo do ar de secagem e umidade de 16 e 22 %, para altura de camada de 0,5 m.....	97
29	Capacidade de expansão do milho-pipoca, para os tamanhos de grãos; (peneira $\geq 15$ , peneira $< 15$ e produto sem classificação), na faixa de teor de umidade final de 09 a 15 %.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela nº.	Assunto	Página
1	Poder calorífico inferior de alguns combustíveis .....	14
2	Condições ambientes, durante a realização dos testes experimentais com o amendoim, para teores de umidade iniciais variando de 18,5 a 12 %, altura de camada de 0,5 e 1,0 m, no período de 12 a 26/02/94. ....	38
3	Resultados obtidos nos testes de secagem com o amendoim, teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e altura de camada de 0,5 e 1,0 m. ....	39
4	Valores médios de temperatura e umidade relativa ambiente, registrados durante os testes experimentais com o amendoim, para umidade iniciais variando de 18,5 a 12 %, altura de camada de 0,5 e 1,0 m, no período de 12 a 26/02/94. ....	40
5	Resultados médios dos experimentos realizados com o amendoim para teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e altura de camada de 0,5 e 1,0 m. ....	40
6	Custos da secagem do amendoim, por kg de água retirada, nos diversos tratamentos, para alturas da camada 0,5 e 1,0 m, utilizando a energia elétrica como combustível. ....	55
7	Custos comparativos da energia requerida para aquecimento do ar, através da energia elétrica, lenha e bagaço de cana, com o amendoim, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m. ....	57
8	Custos totais de secagem (ventilador + aquecimento do ar) do amendoim, considerando o produto seco, após a retirada de 1000 kg de água. ....	59
9	Valores médios qualitativos de 100 vagens para diversos fatores externos do amendoim, no recebimento do produto. ....	61
10	Valores médios qualitativos de diversos fatores externos do amendoim após a secagem, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m. ....	62

11	Condições ambientes, durante o desenvolvimento do experimento, para diferentes teores de umidade, 16 e 22 %, e altura de camada 0,5 m, com o milho-pipoca, no período de 01 a 19/03/94.....	67
12	Resultados obtidos dos experimentos realizados com milho-pipoca, para os teores de umidade iniciais de 16 e 22 %, e altura da camada de 0,5 m .....	68
13	Energia requerida em MJ/kg, em função do fluxo e temperatura do ar de secagem, utilizados no experimento com milho-pipoca, para umidade iniciais de 16 e 22 %, respectivamente e 0,5 m de altura de camada .....	85
14	Custo da secagem do milho-pipoca, por kg de água retirada, nos diversos tratamentos, para umidade iniciais de 16 e 22 %, respectivamente, utilizando a energia elétrica como combustível .....	88
15	Custos comparativos da energia requerida para aquecimento do ar através de energia elétrica, lenha e bagaço de cana, com o milho-pipoca, para teores de umidade iniciais de 16 e 22 % e 0,5 m de altura de camada .....	90
16	Custos totais de secagem (ventilador + aquecimento do ar) do milho-pipoca, considerando o produto seco, após a retirada de 1000 kg de água.....	92
17	Grãos trincados em função do processo de secagem do milho-pipoca, para os teores de umidade de 16 e 22 %, respectivamente, e 0,5 m de altura da camada.....	96
18	Teste Tukey para médias da capacidade de expansão do milho-pipoca, para diferentes tamanhos de grãos, na faixa de 09 a 15 % de teor de umidade final .....	98

## RESUMO

A secagem artificial é parte fundamental na modernização da agricultura, é pré condição para que se possa armazenar o produto com segurança por longos períodos, sendo um processo altamente dispendioso em energia calorífica ou mecânica para o aquecimento e movimentação do ar. Os secadores de grãos, normalmente são selecionados, observando-se apenas a sua capacidade nominal, raros são os casos em que a eficiência energética é relacionada. Na eficiência do processo de secagem do amendoim e milho-pipoca, foram considerados os aspectos energéticos, econômicos e qualitativos. A cultura do amendoim se constitui numa excelente fonte de alimentos, fornecendo matéria prima para a obtenção de uma infinidade de produtos industrializados, tem como um dos principais problemas, a ausência de equipamentos e instalações adequadas para secagem e armazenagem do produto. O milho-pipoca é utilizado exclusivamente para o consumo humano, sendo uma ótima alternativa de renda para produtores e processadores do produto. Há contudo, escassez e muitas dificuldades em se obter informações sobre a cultura. O presente trabalho teve como objetivo, avaliar a influência dos parâmetros de secagem (temperatura e fluxo de ar), teor de umidade inicial e altura da camada do produto na eficiência do processo de secagem e na qualidade do amendoim e milho-pipoca. O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Secagem da FEAGRI/UNICAMP, em um secador de camada fixa. Foi utilizado três temperaturas (40, 45 e 60 ° C), três fluxos de ar (12,5 , 18,0 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>), altura de camada de 0,5 e 1,0 m e umidade inicial variando de 18,5 a 12,0 % para o amendoim, e 0,5 m e umidade inicial de 16 e 22 % para o milho-pipoca, totalizando 41 testes de secagem. Os resultados indicaram que os tratamentos com temperatura de 40 ° C

e fluxos de 18 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> e maior umidade inicial, 18 % para o amendoim e 22 % para o milho-pipoca, obtiveram os melhores resultados, tanto para a eficiência do processo de secagem, como na qualidade dos produtos utilizados. A temperatura de 60 ° C, foi prejudicial para a qualidade do amendoim e milho-pipoca. Os dados mostraram que foi possível trabalhar com temperaturas de até 45 ° C, sem afetar significativamente a qualidade dos produtos. Os experimentos realizados, tendo os produtos com menor teor de umidade inicial foram economicamente mais eficientes. O conjunto motor-ventilador, foi um dos principais fatores de utilização de energia quando se usou temperaturas do ar de secagem de 40 e 45 ° C. A capacidade de expansão do milho-pipoca obteve os melhores resultados com os teores de umidade finais na faixa de 10 a 11 %.

## 1. INTRODUÇÃO

A secagem artificial é parte fundamental na modernização da agricultura. Tem sido o método mais comum e eficiente na preservação de grãos, sendo pré condição para que se possa armazenar o produto com segurança por longos períodos. É o processo mais rápido e o menos dependente das condições atmosféricas locais.

O processo de secagem, conjugado com sistemas adequados de armazenagem, possibilita uma oferta mais homogênea dos produtos durante o ano todo, atuando a favor da estabilização dos preços, fazendo com que o agricultor possa participar de etapas e épocas mais compensadoras de comercialização, constituindo-se em fator de distribuição de renda para as famílias rurais. O segmento pós-colheita é de suma importância, para que o produtor possa organizar melhor sua produção e suas atividades agropecuárias.

Grande parte da produção brasileira, apesar dos avanços tecnológicos no processamento pós-colheita, ainda adota a forma primitiva de secagem, ou seja, secagem naturalmente no campo por longos períodos, acarretando na maioria das vezes perdas irreparáveis. Segundo Junior (1983), citado por SILVA & PINTO (1993), cerca de 80 % da produção brasileira é secada de maneira natural.

A secagem artificial é um processo altamente dispendioso em energia calorífica ou mecânica para o aquecimento e movimentação do ar. A secagem de grãos, requer mais que 65% do total da energia usada na produção e processamento de milho, SOKHANSANJ e QUEIROZ (1984).

Os secadores de grãos, normalmente são selecionados, observando-se apenas a sua capacidade nominal, raros são os casos em que a eficiência energética é relacionada. Estes



dados geralmente não são fornecidos pelos fabricantes de secadores, LAI & FOSTER (1977) e BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978).

MEYER *et al.* (1982) afirmam que o requerimento de energia pode ser muito aumentado pelas perdas térmicas no sistema e pelas perdas no sistema de aquecimento utilizado. Afirmam também, que a maioria dos secadores contínuos em uso, perdem aproximadamente 65% da energia fornecida ao ar. A secagem em camada fixa é um processo relativamente simples e um dos mais viáveis técnica e economicamente de ser implementado junto a pequenas propriedades rurais.

Nos custos da secagem, a energia requerida é um dos principais fatores a serem observados. E, é grandemente influenciada pela escolha das condições de secagem, e pelo conteúdo inicial e final do teor de umidade do produto, justificando a importância do estudo e pesquisa de métodos eficientes de secagem.

Para obter uma seleção apropriada de um sistema de secagem, é necessário que se faça uma análise prévia e criteriosa das necessidades energéticas requeridas no processo de secagem, de maneira a conseguir uma combinação muito favorável entre custos e qualidade final do produto.

A cultura do amendoim se constitui numa excelente fonte de alimentos, rica em proteína e óleo comestível de fácil digestibilidade, fornecendo matéria prima para a obtenção de uma infinidade de produtos industrializados. O estado de São Paulo participa com aproximadamente 81% do total da produção brasileira. Esta produção se encontra em processo de declínio, passando do plantio de 670.000 ha em 1971 para 85.516 ha em 1989, sendo uma das principais causas deste declínio a ausência de equipamentos e instalações adequadas para secagem e armazenagem do produto.

O milho-pipoca é uma cultura utilizada exclusivamente para o consumo humano, sendo uma ótima alternativa de renda para os produtores rurais, e principalmente para quem processa o produto e o vende na forma de pipoca. Há contudo escassez e muitas dificuldades em se obter informações sobre produção, beneficiamento, armazenamento e

comercialização do milho-pipoca. O volume de expansão é a principal característica a ser avaliada na qualidade deste produto.

Com o objetivo de fornecer informações que poderão auxiliar na otimização do processo de secagem, esse trabalho visa analisar e determinar a influência de parâmetros fundamentais, como temperatura e fluxo de ar de secagem, altura de camada e teor de umidade inicial e final do produto no requerimento de energia e velocidade de secagem, nos custos e uniformidade de secagem, bem como na qualidade final do amendoim e milho-pipoca. Podendo desta forma contribuir no planejamento e seleção de sistemas de secagem mais eficientes energética, técnica e economicamente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

- Determinar a eficiência do processo de secagem do amendoim e milho-pipoca em um secador de leito fixo.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar a influência da temperatura e do fluxo de ar de secagem, da altura da camada e umidade inicial do produto, no requerimento de energia e velocidade de secagem.
- Determinar a condição de secagem mais eficiente para o milho-pipoca e amendoim em função dos parâmetros utilizados.
- Comparar os custos relativos à utilização da energia elétrica para aquecimento do ar, com alguns subprodutos como a lenha e bagaço de cana.
- Avaliar a influência da temperatura e do fluxo de ar de secagem, da altura da camada e umidade inicial do produto, na qualidade final do amendoim e milho-pipoca.
- Determinar os custos de secagem do amendoim e milho-pipoca por 1000 kg de produto seco.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Caracterização dos produtos

##### 3.1.1. Amendoim

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma planta herbácea, dicotiledônea, nativa da América do Sul, hoje difundido em todos os continentes. A cultura do amendoim é uma leguminosa com processo especial de frutificação, denominado geocarpia, em que uma flor aérea, após ser fecundada, produz um fruto subterrâneo.

Como alimento humano, o amendoim tem elevada quantidade de calorias, cerca de 596 calorias em cada 100 gramas, é rico em proteínas, 25 a 30 %, e contém de 45 a 50 % óleo comestível. A torta de amendoim, após extração do óleo, contém perto de 40 % de proteína, o que o torna um alimento de excepcional qualidade para alimentação animal.

As vagens do amendoim ao serem colhidas detêm um teor de umidade entre 35 a 40 %, que necessita ser reduzida a 10 % ou menos, antes de serem armazenadas adequadamente. Nem todas as vagens de uma mesma planta ficam maduras na época da colheita, já que a floração se estende por largo período, em que há contínua formação de vagens. Dessa forma, na colheita, as plantas de amendoim sempre exibem vagens em todos estádios de desenvolvimento, que podem prejudicar a conservação do produto no caso de uma secagem incompleta, CANECCHIO (1987).

A produção brasileira de amendoim está em processo de declínio, passando de 670.000 ha de área plantada em 1971, COFFELT (1989), para 85.516 ha em 1989, sendo que deste total, o estado de São Paulo, participa com 81,4 %, ou seja, com 68.635 ha (IBGE

1994). Grande parte deste problema é atribuído a falta de equipamentos e instalações adequadas para a secagem e armazenagem do amendoim, fazendo com que o produto fique sujeito a ação das condições climáticas, nem sempre favoráveis, o que implica no comprometimento da qualidade do amendoim.

### 3.1.2. Milho-Pipoca

O milho-pipoca (*Zea mays* L.) é uma cultura tipicamente do continente americano, descoberta em Bat Cave no Novo México a 2500 A. C., BRUNSON (1955).

Segundo SILVA (1993), o milho-pipoca é fruto de algumas alterações genéticas de um capim denominado teosinte. As fibras de celulose são densamente trançadas, como as de um tecido. Por isso sua resistência mecânica é quatro vezes maior que no milho comum. A resistência da película da pipoca permite que o calor chegue ao amido sem que a casca se queime. Com o calor, o amido expande-se aumentando a pressão interna dos grãos, até o momento da explosão, a uma temperatura de 180 ° C e a uma pressão de 135 libras. O volume de expansão é a principal característica a ser avaliada na qualidade deste produto. A venda do milho-pipoca gera divisas no mundo todo, SABATINI (1993).

Há contudo, escassez e muitas dificuldades em se obter informações sobre produção, beneficiamento, armazenamento e comercialização do milho-pipoca. Na literatura pesquisada, incluindo os Anuários Estatísticos do IBGE, não se encontra nenhuma referência a produção e consumo do milho-pipoca no país.

### 3.2. Princípios gerais de secagem

Os grãos fazem parte da categoria de produtos higroscópicos. Esses produtos têm a propriedade de realizar intercâmbio de água, sob a forma de vapor, com o ar ambiente que os envolve, por adsorção ou dessorção, segundo as condições recíprocas de umidade do

produto e umidade relativa do ar. Durante o processo de secagem, a retirada da umidade é obtida por movimentação da água, graças a uma diferença de pressão parcial de vapor de água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve, LASSERAN (1978), FORTES & OKOS (1980) e BROOKER *et al.* (1992).

A secagem de produtos biológicos, sob condições externas constantes, considerando os grãos como partículas individuais, pode apresentar duas fases diferentes no seu comportamento durante o período de secagem. Uma fase inicial, com perda de umidade à taxa constante e uma ou duas fases seguintes com taxas decrescentes de secagem, FORTES & OKOS (1980). Os grãos normalmente apresentam somente a taxa de secagem decrescente, a qual vai reduzindo continuamente durante todo o processo de secagem. Assim, a transferência de calor nem sempre é compensada pela transferência de massa na mesma proporção. O fator limitante nesta fase é a redução da migração da umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta podendo atingir a temperatura do ar de secagem. Somente em produtos altamente hidratados com teores de umidade acima de 70 - 75 %, é que se pode obter a redução de umidade durante o período inicial de secagem a taxas constantes, BROOKER *et al.* (1992).

A secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa. A energia térmica necessária para a evaporação de água é fornecida pelo ar (transferência de calor do fluido para o produto a ser secado) e a água evaporada do grão é em seguida absorvida e retirada por esse ar (transferência de massa do produto para o fluido de secagem). O ar desempenha um duplo papel, o de fluido transportador de calor e de fluido transportador de vapor. O requerimento de energia térmica provocado pela evaporação da água é acompanhado por um resfriamento do ar. A absorção do vapor d'água pelo ar faz com que ocorra o abaixamento da temperatura. O ar recupera, sob a forma de vapor, o que perdeu sob a forma de calor sensível, sendo esta energia, de recuperação muito difícil no domínio das técnicas convencionais de secagem. Por isso a secagem é considerada como sendo uma operação dispendiosa em energia, LASSERAN (1978) e BROOKER *et al.* (1992).

Do ponto de vista da aplicabilidade, a secagem pode ser considerada como um pré-requisito indispensável para que se tenha um armazenamento seguro e com qualidade, bem como facilita a automação e modernização no processamento e movimentação no período pós-colheita dos produtos. Dentro deste contexto OHJA (1974) definiu a secagem, como sendo o método universal de condicionar os grãos pela remoção de água, a um nível tal que os mesmos se encontrem em equilíbrio com o ar ambiente, de maneira a preservar a aparência e a qualidade nutritiva dos grãos como alimentação animal e/ou humana e a viabilidade como semente.

---

### 3.3. Métodos de secagem

Os métodos utilizados para processar a secagem podem ser classificados em métodos natural e artificial.

#### 3.3.1. Método natural

O método natural consiste na secagem dos produtos no próprio campo ou em terreiros, ditada principalmente pela energia solar incidente e pelo movimento do ar. Quando em terreiros o produto é revolvido periodicamente, a fim de acelerar o processo. A secagem natural expõe o produto à ação de agentes biológicos e condições climáticas adversas por longos períodos, ocasionando variações muito grandes no teor de umidade contida nos grãos, dificultando uma melhor sincronização da colheita, podendo acarretar desta forma elevadas perdas de produção, SILVA *et al.* (1983). Cerca de 80 % da produção nacional ainda é secada de maneira natural, sendo que a maior parte desta produção é proveniente de pequenos e médios produtores, os quais são responsáveis por cerca de 75 % do total produzido no país, Junior (1983) apud SILVA & PINTO (1993). Este método têm como principal vantagem o baixo custo, tanto nas instalações como no requerimento de

energia, mas requer um maior tempo de secagem e é altamente dependente das condições atmosféricas favoráveis para que a secagem ocorra com sucesso.

### 3.3.2. Método artificial

A alternativa para a secagem natural no campo é a utilização de técnicas de secagem artificial, submetendo o produto úmido, em um secador, à ação de uma corrente de ar forçado e aquecido. A secagem artificial pode ser executada em baixas e/ou em altas temperaturas.

A secagem a baixas temperaturas é considerada aquela executada com ar natural ou levemente aquecido (1 a 10 °C), acima da temperatura ambiente. Normalmente, neste tipo de secagem o produto é seco e armazenado no próprio silo secador. A secagem a baixa temperatura é um processo demorado, por isso, é necessário dimensionar corretamente os sistemas de secagem para que funcionem adequadamente. Além disto, durante a secagem, cuidados especiais devem ser tomados para que o produto não se deteriore. Um dos pontos mais importantes na secagem a baixa temperatura é o fluxo de ar a ser utilizado. Quando bem projetado, poderá se tornar um método econômico e tecnicamente eficiente, podendo ser também um método complementar na secagem a altas temperaturas, aumentando a capacidade do secador.

Entre as vantagens da secagem a baixa temperatura, conforme QUEIROZ & PEREIRA (1982), incluem-se:

- . mínimo manuseio dos grãos;
- . boa qualidade dos grãos;
- . alta eficiência de secagem, porque utiliza a energia do ar atmosférico.

Nas desvantagens incluem-se:

- . limitações quanto ao teor inicial de umidade do produto;



- . processo lento de secagem, resultando em uma alta demanda de energia elétrica para o funcionamento do secador.

- . dependência das condições climáticas.

Dentre os processos de secagem artificial, a secagem em altas temperaturas é o mais rápido e menos dependente das condições atmosféricas locais, devido as altas temperaturas e o fluxo de ar empregado. Permite baixar rapidamente o teor de umidade dos produtos agrícolas colhidos com altos teores de umidade, acima de 20 %, (forragens, frutas, cereais e oleaginosos.), e oferece a estes produtos, condições adequadas para a preservação das qualidades nutricionais, fisiológicas e organolépticas por longos períodos de armazenamento. Diz-se ser secagem a altas temperaturas se o ar de secagem for aquecido a dez ou mais graus Celsius. Naturalmente, este não é um limite rígido, mas um valor que caracteriza o processo como não sendo mais de baixas temperaturas, DALPASQUALE (1984). BROOKER *et al.* (1992) consideraram secagem a altas temperaturas quando o ar for aquecido a 50 ou mais graus Celsius, numa variação de 50 a 300 ° C.

Quando se aumenta a temperatura do ar o mesmo pode absorver mais umidade, com isto o fluxo de ar por unidade de massa de grãos pode ser menor para altas temperaturas de secagem. A utilização de um fluxo de ar menor torna-se vantajoso, pois pode reduzir a potência do motor e tamanho do ventilador, o que implica em menor investimento inicial em equipamentos e um menor consumo permanente de energia durante a sua vida útil.

A importância da secagem para os produtos agrícolas está aumentando cada vez mais, proporcionalmente ao aumento da produção. A secagem permite aos agricultores um maior retorno econômico e segurança no processamento pós colheita. Entre outros fatores relevantes, a secagem em altas temperaturas, conforme HENDERSON & PERRY (1976), BIAGI *et al.* (1993), oferece vantagens como:

- antecipação da colheita "com teor de umidade alto" reduzindo as perdas de campo ocasionadas por intempéries, ação de insetos, pássaros e roedores. A colheita precoce permite também antecipar os trabalhos de cultivo do solo;

- propicia o planejamento da colheita e o emprego mais eficiente de equipamentos e de mão-de-obra;
- armazenamento por longos períodos sem que ocorra deterioração dos produtos;
- permite a formação de estoques reguladores;
- permite a comercialização do produto em épocas de preços mais vantajosos e também obter uma valorização acima dos preços de mercado, pela oferta de produtos de qualidade;
- mantém a qualidade fisiológica das sementes;
- produtos sem valor comercial "in natura" podem conseguir um alto valor agregado pela secagem ou desidratação (frutas, vegetais...), constituindo-se em uma alternativa a mais de renda para os produtores.

### 3.4. Desempenho dos secadores

#### 3.4.1. Capacidade de secagem

É necessário mostrar claramente as diferenças entre a capacidade e eficiência de secagem de um secador ou sistema de secagem. NELLIST (1982), define capacidade de secagem, como sendo a quantidade de produto seco por unidade de tempo, expresso em toneladas por hora, ou no caso de secadores em bateladas, toneladas por 24 horas.

#### 3.4.2. Requerimento de energia

A secagem artificial é um processo altamente dispendioso em energia calorífica ou mecânica para o aquecimento e movimentação do ar. A secagem de grãos, requer mais que 65 % do total da energia usada na produção e processamento de milho, SOKHANSANJ e QUEIROZ (1984).

Os secadores de grãos, normalmente são selecionados, observando-se apenas a sua capacidade nominal; raros são os casos em que a eficiência energética é relacionada. Estes dados geralmente não são fornecidos pelos fabricantes de secadores, LAI & FOSTER (1977); BAKKER - ARKEMA *et al.* (1978).

Considera-se como eficiência energética de um processo de secagem, a energia necessária para retirar uma unidade de peso de água, em MJ/kg de água evaporada, BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978), LASSERAN (1979), NELLIST (1982) e SOKHANSANJ (1984). Teoricamente, é a energia necessária para evaporar um kg de água livre a 100° C, a uma pressão atmosférica. Muitos pesquisadores divergem nos valores relacionados em seus trabalhos quando se referem a eficiência teórica. SOKHANSANJ (1984) considera o valor de 2,2 MJ/kg, enquanto BROOKER *et al.* (1992), NELLIST (1982) e LASSERAN (1979), citam um valor para eficiência teórica de 2,5 MJ/kg de água evaporada.

A grande maioria dos secadores requerem de 3,5 a 10,0 MJ/kg de água evaporada, NELLIST (1982), ou 3,5 a 8,0 MJ/kg por SOKHANSANJ (1984). Em secadores de fluxo cruzado convencional, a energia requerida varia de 5,0 a 9,0 MJ/kg na citação de NELLIST (1982) e de 7,0 a 10,0 MJ/kg em BROOKER *et al.* (1992). Na diferença entre os valores teóricos e os valores práticos realmente obtidos no processo de secagem, encontra-se a maior ou menor eficiência energética dos secadores, SOKHANSANJ (1984).

BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978), sugeriu um índice DPEI (Índice de Avaliação da Performance dos Secadores), que corresponde a energia total requerida por um secador para remover uma unidade de peso de água dos grãos sob determinadas condições. A energia total requerida, inclui a energia para aquecer e movimentar o ar de secagem, bem como, movimentar o produto e os equipamentos.

YOUNG (1984), comparou um sistema convencional de secagem com um sistema com recirculação parcial do ar de secagem com o produto amendoim. Os testes foram executados por um período de três anos, com temperatura do ar de secagem de 35° C,

umidade inicial variando de 19,7 a 34,6 %, e com uma altura de camada de 1,37 metros. Nesta pesquisa, obtiveram um requerimento médio de energia de 8,0 MJ/kg de água evaporada na secagem convencional com uma variação de 5,6 a 11,9 MJ/kg, e na secagem com recirculação parcial do ar obtiveram um requerimento médio de 5,9 MJ/kg com uma variação de 4,2 a 8,1 MJ/kg de água evaporada.

### 3.4.3. Combustíveis

Os combustíveis, em termos práticos, são as substâncias que podem queimar e liberar energia sob a forma de calor. Dentre as características dos combustíveis a mais importante é o poder calorífico. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia despreendida na combustão completa de uma unidade de peso ou volume de determinado combustível. Geralmente, é dividido em poder calorífico superior e inferior, ANDRADE *et al.* (1984) e RIGUETTI & QUEIROZ (1991).

O poder calorífico superior (PCS) é aquele que leva em consideração o calor da condensação do vapor d'água dos produtos da combustão. O poder calorífico inferior (PCI) é aquele que não leva em conta o calor de condensação do vapor d'água formado pelos produtos da combustão, também chamado de poder calorífico líquido ou prático, sendo o que normalmente se utiliza na prática, ANDRADE *et al.* (1984) e LASSERAN (1979).

Nos países em desenvolvimento, a lenha ainda é um dos combustíveis mais baratos, tanto por tonelada quanto por unidade de calor. Não exige mão-de-obra qualificada para sua obtenção e utilização, pode ser armazenada em espaço livre e aberto. Em pequenas propriedades onde as reservas de madeira geralmente são escassas, pode-se solucionar o suprimento de lenha com a implementação de pequenos reflorestamentos em terras impróprias para a agricultura. Outra alternativa para se obter energia para utilização na secagem, são os resíduos agrícolas.

Os resíduos agrícolas, como mostra a Tabela 1, possuem grande potencial energético e podem substituir, em parte ou no todo, as fontes tradicionais de energia. A cultura da cana de açúcar é a que fornece maior quantidade de resíduos com alto potencial energético, tanto com o bagaço como com o palhiço. Segundo RIPOLLI *et al.* (1990), se não houver a queima prévia que normalmente precede a colheita, consegue-se obter com o palhiço (folhas e ponteiros) um valor médio de 16,69 MJ/kg de resíduo de (PCI). No caso do aproveitamento dos resíduos, há de se considerar sempre o excedente, pois é necessário que uma quantidade mínima seja repostada ao solo para manter as condições físico-química e biológicas do mesmo. Outro problema que se tem na utilização dos resíduos orgânicos para fins energéticos é o seu manuseio e adaptação das fornalhas para que se tenha uma combustão completa, e, os mesmos devem estar secos antes da sua utilização. A combustão incompleta pode ocasionar contaminação e aromas indesejáveis, principalmente para produtos destinados à alimentação humana.

Tabela 1 - Poder calorífico inferior de alguns combustíveis.

Combustível	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Fonte
Lenha seca ao ar	11,28 a 15,83	ANDRADE et al. (1984)
Palhiço de cana	16,69	XAVIER et al. (1993)
Bagaço de cana	6,68	ANDRADE et al. (1984)
Casca de arroz	11,04	ANDRADE et al. (1984)
Palha de café	11,72	VALARELLI (1993)
Casca de macadâmia	18,29	XAVIER et al. (1993)
Serragem	13,44	Ravaglia (1965) apud XAVIER et al. (1993)
Bambu	15,83	Ravaglia (1965) apud XAVIER et al. (1993)
Casca de amendoim	8,37 a 16,30	Stouc (1980) apud XAVIER et al. (1993)
Palha de arroz	14,50	VERMA (1990)

#### 3.4.3.1. Fornalhas

A fornalha é definida como um equipamento para promover a queima de determinado combustível, visando o aproveitamento da sua energia térmica. Para isso, o projeto de uma fornalha deve ser baseado nos princípios fundamentais que regem um processo de combustão tecnicamente eficiente, ou seja, mistura de ar-combustível homogênea e na dosagem ideal, espaço e tempo suficiente para que ocorra uma combustão completa e o aquecimento do combustível até sua ignição auto-sustentável SILVA *et al.* (1991)

A avaliação do desempenho de uma fornalha pode ser feita com base no valor de sua eficiência ou rendimento energético, definido como sendo a razão entre a energia disponível nos produtos da combustão e a energia fornecida ao sistema constituído por este dispositivo. Segundo SILVA *et al.*(1991), em um estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto, obtiveram um rendimento que variou de 44 a 83 %, em função direta do excesso de ar comburente na câmara de combustão.

#### 3.4.3.2. Energia elétrica

A energia elétrica é um combustível muito dispendioso para ser utilizado como fonte principal para aquecimento do ar de secagem. A sua utilização se restringe a secadores em escala de laboratório, onde permite um melhor controle das temperaturas a serem empregadas durante os testes de pesquisa.

#### 3.5. Parâmetros de secagem

Os parâmetros que influenciam a taxa e a eficiência de secagem, quando se secam grãos com utilização de ar forçado, são principalmente, a temperatura e umidade relativa

ambientes, temperatura e fluxo do ar de secagem, teor de umidade inicial, final e de equilíbrio dos grãos, a temperatura e velocidade dos grãos no secador, bem como a variedade e a história do produto do plantio até a colheita, BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978) e DALPASQUALE (1984).

Os parâmetros de secagem não são independentes, influem na taxa e eficiência de secagem como um conjunto de fatores e não isoladamente. O manejo correto destes parâmetros permite a determinação do equipamento mais adequado para condições de secagem específicas.

A temperatura e a umidade relativa ambiente, muitas vezes, não são consideradas de importância para a secagem em altas temperaturas. Estes parâmetros não têm influência significativa sobre a taxa de secagem, entretanto, determinam a quantidade de calor sensível necessária para atingir a temperatura de secagem. Quanto menor for a temperatura ambiente, maior será a energia requerida para o aquecimento desse ar, o que resulta em maior custo de energia.

A temperatura do ar de secagem é o parâmetro de maior flexibilidade num sistema de secagem em altas temperaturas. A temperatura do ar conjugada com o fluxo do ar de secagem, são os fatores responsáveis pela quantidade de água removida no processo de secagem dos produtos agropecuários. Ambos influenciam significativamente na eficiência de secagem e na qualidade do produto final. O aumento da temperatura implica em menor gasto de energia por unidade de água removida e maior velocidade na taxa de secagem e maior gradiente de temperatura e umidade, enquanto que um aumento no fluxo de ar reduz a eficiência energética mas também aumenta a velocidade de secagem, BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978), LASSERAN (1978), LACERDA *et al.* (1982), DALPASQUALE (1984), NELLIST (1987), BAKER *et al.* (1993).

LACERDA *et al.* (1982), na avaliação experimental de um secador comercial intermitente de arroz, com temperaturas de 45, 80, 100 e 115 ° C e umidade inicial variando de 17,8 a 21,3 % em base úmida, concluíram que o consumo de lenha diminuiu a

medida que se aumentou a temperatura do ar de secagem, passando de um valor médio de 510 kg de lenha a 45 ° C, para 323,6 kg a 115 ° C, secando 9 t de arroz com umidade final em torno de 13 %.

SILVA *et al.* (1983) testaram um secador de fluxo cocorrente para secagem de café, com temperaturas do ar de secagem de 80, 100 e 120 ° C e umidade inicial de  $24,7 \pm 6,9$  %, com secagem até  $10,7 \pm 1,6$  %, observaram que o mesmo é mais eficiente termicamente quando se utilizam temperaturas do ar de secagem mais elevadas (100 a 120 °C), obtendo valores de 4,9 e 4,8 MJ/kg de água evaporada respectivamente. Para temperatura de 80 ° C o valor obtido foi de 5,7 MJ/kg.

MILLER & WHITFIELD (1984), avaliando a performance de um secador de grãos de fluxo misto, através de simulação, obtiveram redução na energia específica requerida, com o aumento da temperatura do ar de secagem, passando de 4,8 MJ/kg à 60 ° C para 4,3 MJ/kg a 120 ° C, e a taxa de secagem aumentou de 1,77 para 4,67 t/h. Aumentando o fluxo de ar, aumenta também o consumo específico de energia de 3,9 MJ a 4,0 kg de ar /min para 5,1 MJ/kg a 12,0 kg de ar /min. Ao se aumentar o fluxo de ar, perde-se mais calor no ar de exaustão; o ar não sai saturado. Aumenta-se também a perda de carga, sendo necessários ventiladores com maior capacidade, o que resulta num maior consumo de energia do sistema.

A grande maioria dos pesquisadores citados, quando se referem a maior eficiência com o aumento da temperatura, fazem referências a temperaturas elevadas, normalmente acima de 100°C ou com variações muito grandes entre a temperatura menor e a maior, variando por exemplo de 40 para 100 ° C. Mesmo nestas condições nem sempre o aumento de temperatura resulta em uma maior eficiência de secagem. Há de se considerar vários aspectos que podem influenciar neste particular, como o tipo de produto e/ou secador. WALKE & BAKKER-ARKEMA (1978 ), estudando a eficiência energética de um secador de arroz com fluxo concorrente a temperaturas de 100 e 150 ° C, obtiveram que sob condições constantes de fluxo de ar e grãos, a eficiência energética do secador diminuiu



com o aumento da temperatura do ar de secagem, requerendo 3,6 MJ/kg a 100 ° C e 3,9 MJ/kg a 150 ° C. Entretanto, um aumento na temperatura do ar acompanhado de um maior fluxo de grãos ou um menor fluxo de ar, resulta em economia de energia , passando de 3,6 MJ/kg a 3,78 m<sup>3</sup>/s para 3,2 MJ/kg a 2,36 m<sup>3</sup>/s de fluxo de ar.

MARTINS & STROSHINE (1993), estudando a eficiência de secagem em camadas finas com temperaturas de 40, 80 e 118 ° C, para dois diferentes híbridos, obtiveram um aumento no requerimento de energia à medida que a temperatura de secagem foi aumentada de 40 para 80 ° C, a partir daí, diminuiu quando a temperatura foi elevada para 118 ° C. Aumentando o fluxo de ar de 67 m<sup>3</sup>/min.t para 133 m<sup>3</sup>/min.t, o requerimento de energia foi maior para ambos os híbridos estudados. Neste mesmo experimento observaram que o fator genético também influencia significativamente na taxa de secagem. A energia requerida para secar híbridos com taxa de secagem mais lenta foi até 10 % superior do que híbridos com taxa de secagem mais rápida.

YOUNG & DICKENS (1975) avaliaram os efeitos de vários parâmetros de secagem de grãos em secador de camada fixa com fluxo cruzado de ar, considerando as condições experimentais , temperatura variando de 60 a 220 ° F, fluxo de ar com variação de 0,4 a 4,8 m<sup>3</sup>/min.m<sup>3</sup>, altura de camada de 30 cm e secando de 20 para 15 %. Os testes foram feitos através de simulação matemática e mostraram que os custos com combustível por metro cúbico tendem a aumentar com o aumento da temperatura de secagem, no experimento, de 60 até 110 ° F, sendo o valor máximo a 110 ° F e a partir desta temperatura a eficiência energética aumenta. Isto demonstra que nem sempre se tem maior eficiência com o aumento de temperatura do ar de secagem. Outro resultado foi o aumento dos custos com combustível para todas as temperaturas, quando foi aumentado o fluxo de ar. Concluíram também que altas temperaturas e baixos fluxos de ar aumentam o gradiente de umidade na coluna de secagem.

LI & MOREY (1984), pesquisando o efeito de parâmetros de secagem em camadas finas com o produto milho, sob condições experimentais de temperaturas

variando de 27 a 116 ° C e umidade inicial de 26 a 29 %, concluíram que a temperatura de secagem é o parâmetro que exerce maior influência sobre a taxa de secagem entre todas as variáveis estudadas ( fluxo de ar, umidade inicial do produto e umidade relativa do ar). A umidade relativa tem menor efeito sobre a taxa de secagem que a umidade inicial do produto, podendo ser desconsiderada quando se utiliza altas temperaturas e camadas finas de produto na secagem. A umidade inicial afeta significativamente a razão de umidade e influi na taxa de secagem.

TROEGER & BUTLER (1980), trabalhando em secagem de amendoim com fluxo de ar intermitente, comparando duas vazões, de 12,5 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> de amendoim como a vazão mínima recomendada e a de 25m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, a mais utilizada entre os produtores de amendoim nos Estados Unidos, com umidades variando de 16 a 32 %, concluíram que os tratamentos com fluxos de ar mais elevados mostraram resultados similares aos de fluxos menores. O fluxo maior aumentou o consumo de energia em 20% e apresentou umidade mais uniforme.

### 3.6. Qualidade dos produtos

A qualidade das diferentes espécies de grãos é afetada por vários fatores, como; condições ambientes durante o período de crescimento da cultura, período e sistema de colheita, tratamento pós-colheita, práticas de armazenagem e procedimentos no transporte da produção. O comércio internacional normalmente reconhece, nos padrões de qualidade dos grãos em diversos países, características qualitativas como teor de umidade, grãos quebrados, impurezas, coloração e grãos danificados ou mal formados BROOKER et al. (1992).

### 3.6.1. Amendoim

A qualidade do amendoim está relacionada a diversos fatores, dentre os quais pode-se destacar o desenvolvimento da microflora e micotoxinas, porcentagem de grãos quebrados e separação de cotilédones durante o descascamento, bem como o desprendimento da película dos grãos KUNZE *et al.* (1968) e WOODROF (1983).

Todos os aspectos citados são influenciados por parâmetros relacionados ao manuseio durante e pós-colheita (colheita manual ou mecânica, teor de umidade, temperatura e fluxo de ar de secagem, taxa de secagem, processamento e condições de armazenamento).

Ao conduzir um experimento, utilizando fluxo de ar de secagem de forma intermitente, TROEGER & BUTLER (1980), constataram que os grãos localizados na parte inferior da coluna de secagem detinham 33 % a mais de película solta comparativamente aos grãos localizados na parte superior da coluna de secagem. Este efeito, segundo os autores foi devido ao período de exposição do produto a uma maior temperatura de secagem, causando uma secagem excessiva na parte correspondente a entrada do ar aquecido. Conforme WOODROF (1983), a secagem rápida do amendoim e/ou com temperaturas muito elevadas, pode resultar em descoloração, aumento na rancidez no número de grãos com película solta e cotilédones separados, o que afeta a aceitação do produto a nível de comercialização.

### 3.6.2. Milho - pipoca

A capacidade de expansão da pipoca é um dos fatores mais importantes, quando se faz referência a qualidade do milho-pipoca e, entre os principais fatores que podem influenciar a expansão do milho-pipoca destacam-se o teor de umidade dos grãos,

temperatura de secagem, propriedades físicas dos grãos (tamanho e peso específico) e trincamento dos grãos.

Bemis (1959) e Huelson (1960), apud HAUGH *et al.* (1976), relataram que o teor ótimo de umidade para o volume máximo de expansão do milho-pipoca, foi de 13,0 e 12,5 % respectivamente.

Eldredge & Thomas (1959), apud HAUGH *et al.* (1976) e MERLO *et al.* (1988), encontraram como melhor teor de umidade para o máximo de expansão do milho-pipoca, entre 13,0 e 14,0 %

O volume de expansão de diversos híbridos estudados, aumentou para o teor de umidade acima de 11,5 %, sendo que nos teores de umidade ótimos para expansão (12,5 e 15,5%), o volume de expansão permaneceu constante enquanto se aumentava os teores de umidade nesse mesmo intervalo. Aumentos adicionais acima de 15,5 % de umidade causaram uma redução da expansão do milho-pipoca, HAUGH *et al.* (1976).

Com o milho-pipoca secado com teor de umidade abaixo de 14%, o volume de expansão permanece relativamente alto quando se diminui o teor de umidade até 11,0 %. Existe uma relação diferente quando o milho-pipoca é reumedecido a partir de 11% de umidade inicial. O volume de expansão varia menos com o aumento do teor de umidade do produto. Começa haver uma diminuição significativa quando o produto alcançar 16,0 % de umidade, quando se relaciona o teor de umidade do milho-pipoca com o volume de expansão, o histórico desta umidade deve ser considerado WHITE *et al.* (1980).

O teor de umidade na colheita do milho-pipoca é outro fator que pode afetar as características de secagem e a qualidade final do produto WHITE *et al.* (1981).

Lien & Haug (1975), e WHITE *et al.* (1981), recomendam a colheita do milho-pipoca com teor de umidade inicial variando de 14 a 18%. Para debulhar e secar o milho-pipoca Bemis (1959) apud WHITE *et al.* (1981), recomendam como teor de umidade inicial, abaixo de 25%.

Para os diversos tamanhos de grãos, o teor de umidade adequado para a máxima expansão da pipoca, nos cultivares South American Mushroom e Mays Forte 1001, situou-se entre 10,5 e 11,5% SAWASAKI *et al.* (1986) e DALBELLO *et al.* (1995). Willier & Brunson (1927) e Lyerly (1942), apud HAUGH *et al.* (1976), encontraram que o volume de expansão aumenta com a redução do tamanho dos grãos do milho-pipoca. Relataram que existe uma correlação entre o volume de expansão, o tamanho e a forma. Grãos menores, mais curtos e mais redondos tendem a dar um maior volume de expansão do milho-pipoca.

SPRAGUE (1955) e Weatherwax (1921), apud HAUGH *et al.* (1976), recomendam que a temperatura do óleo durante a expansão do milho-pipoca deve estar entre 175 a 205 °C e que a expansão se complete num período máximo de 2 a 3 minutos.

Eldredge & Thomas (1959), apud HAUGH *et al.* (1976) e HAUGH *et al.* (1976), afirmaram que o milho-pipoca que tiver maior peso específico, dará um maior volume de expansão, acreditam que é devido a um teor de amido mais denso existente nestes grãos.

WHITE *et al.* (1982), levantam a hipótese de que o trincamento do milho-pipoca secado com ar aquecido artificialmente é causado pela redistribuição da umidade após os grãos terem sido retirados do secador, devido ao gradiente de umidade existente no grão ao final do período de secagem. O trincamento dos grãos ocorreu muito mais devido a umidade relativa em que o produto foi secado do que propriamente a temperatura de secagem. Testes realizados com umidade relativa de secagem acima de 60%, praticamente não houve trincamento, independentemente da temperatura utilizada para a secagem. O trincamento dos grãos não reduziu significativamente o volume de expansão do milho-pipoca, não importando o número de trincas.

WHITE & ROSS (1972), avaliaram o efeito da temperatura de 38 a 104 °C, na secagem e resfriamento de milho e obtiveram que o número de grãos trincados aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem e o resfriamento lento resultou em redução do número de grãos trincados.

DALBELLO *et al* . (1995), avaliaram a capacidade de expansão do milho-pipoca em diferentes alturas da coluna de secagem ( 5 , 25 e 50 cm ), e observaram que a mesma foi influenciada pelos diferentes teores de umidades finais do produto. A medida que aumentou o teor de umidade final do produto, diminuiu a capacidade de expansão. O melhor tratamento para 16 e 22 % de umidade inicial, logo após a secagem, foi conseguido com temperatura de 45 ° C e fluxo de ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, onde obtiveram um valor médio de 29,48 e 28,49 cm<sup>3</sup>/g respectivamente. Com as temperaturas de 40 e 45 ° C e teor de 22 % de umidade inicial, os melhores resultados, foram obtidos na primeira camada (5cm) da coluna de secagem. Os valores médios da capacidade de expansão para o produto com umidade inicial de 22 % foram ligeiramente superiores aos valores obtidos com o produto a 16 % de umidade inicial.

---

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da fase experimental deste trabalho foi realizado no Laboratório de Secagem do Departamento de Pré-processamento de Produtos Agropecuários, da Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, no período Fevereiro a Março de 1994.

### 4.1. Produtos

#### 4.1.1. Amendoim

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) da variedade tatuí, utilizado no experimento foi proveniente do município de Sertãozinho, SP. Foram utilizados 600 kg de amendoim, sendo, 24 kg para cada teste realizado. O produto chegou até a unidade experimental com um teor de umidade inicial de 23 %, e ficou armazenado em dois silos metálicos aerados. A aeração e o forte calor da época fizeram com que o produto fosse secando nos próprios silos, impossibilitando a manutenção do teor de umidade do produto nas mesmas condições iniciais do recebimento. Os testes de secagem tiveram sequência até que o amendoim alcançou 12 % de umidade inicial.

A grande quantidade de produto, 2000 kg, associado a uma grande quantidade de impurezas, resto de culturas e materiais estranhos, fez com que a sua manutenção em local mais adequado e refrigerado ficasse impossibilitado.

Antes de se iniciar os testes experimentais de secagem, o produto passou por um processo de pré-limpeza manual com o auxílio de peneiras, onde eram retiradas impurezas

menores que as vagens do amendoim, materiais estranhos e parte dos grãos debulhados com a colheita mecânica. Os materiais estranhos, os quais não passavam pelas peneiras, foram separados manualmente.

#### 4.1.2. Milho - pipoca

Foram utilizados 500 kg do milho-pipoca (*Zea mays* L. ) da variedade Mays Forte 1001, produzidos no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), sendo, 25 kg para cada teste realizado. O produto foi colhido e debulhado manualmente e mantido no Laboratório de Sementes em ambiente resfriado a 20 ° C, em sacos plásticos até o final do experimento. O produto foi colhido com teores de umidade inicial diferentes, 16 e 22 %, e o experimento foi conduzido mantendo esta condição diferenciada. A forma como se procedeu a colheita, permitiu que se obtivesse um produto com mais de 97 % de pureza, dispensando assim a pré-limpeza.

### 4.2. Equipamentos

#### 4.2.1. Secador

Para a avaliação deste experimento, foi utilizado um secador de madeira de base quadrada em escala de laboratório com sistema de secagem em coluna e camada fixa, construído por GUALBERTO (1990), com capacidade estática de 0,25 m<sup>3</sup>. O secador é constituído por 3 colunas de secagem, com um sistema de 5 bandejas teladas móveis em cada coluna, nas quais foram realizados todos os controles dos parâmetros de secagem (temperatura e umidade do produto). Cada coluna continha ainda quatro pequenas câmaras de secagem entre as bandejas móveis. O produto que não estava nas bandejas móveis foi distribuído de forma proporcional nas quatro câmaras de secagem existente em cada



coluna, com o intuito de complementar a altura de camada desejada de 50 cm. O secador utilizado está representado nas Fig. 1 e 2. Os demais componentes serão detalhados nos itens subsequentes.

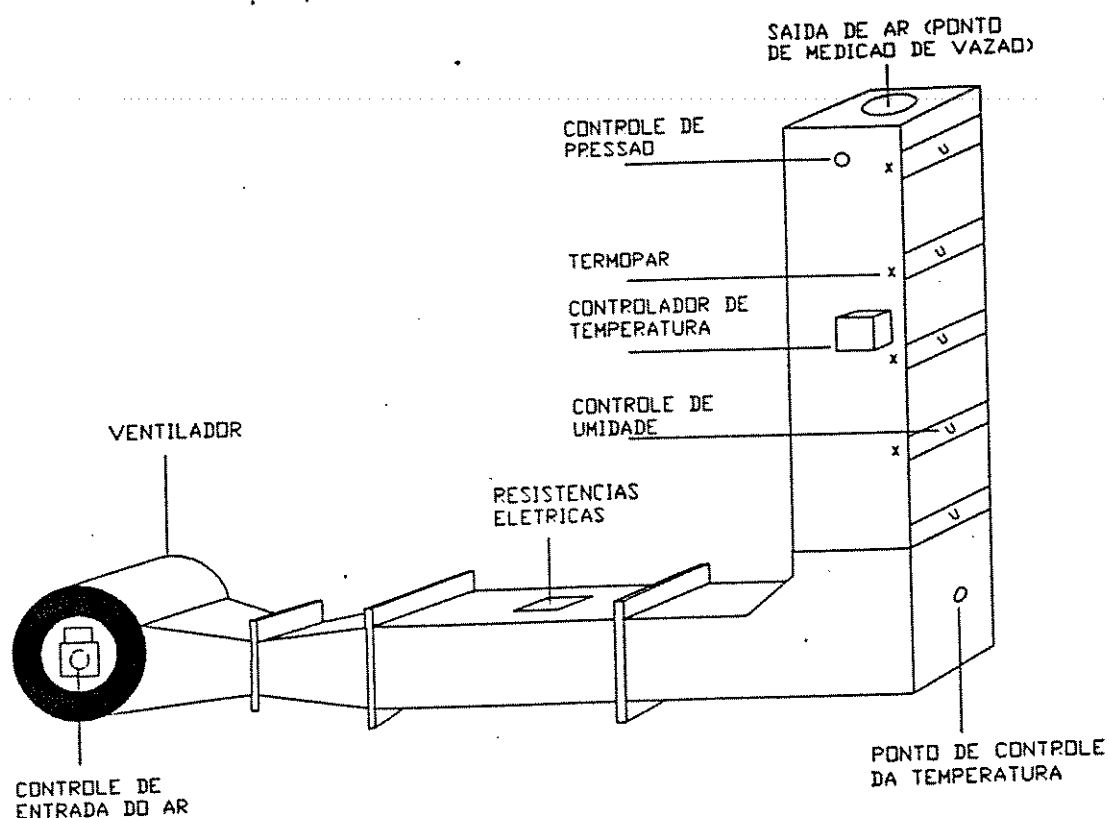


Figura 1 - Esquema do secador com uma coluna de secagem.

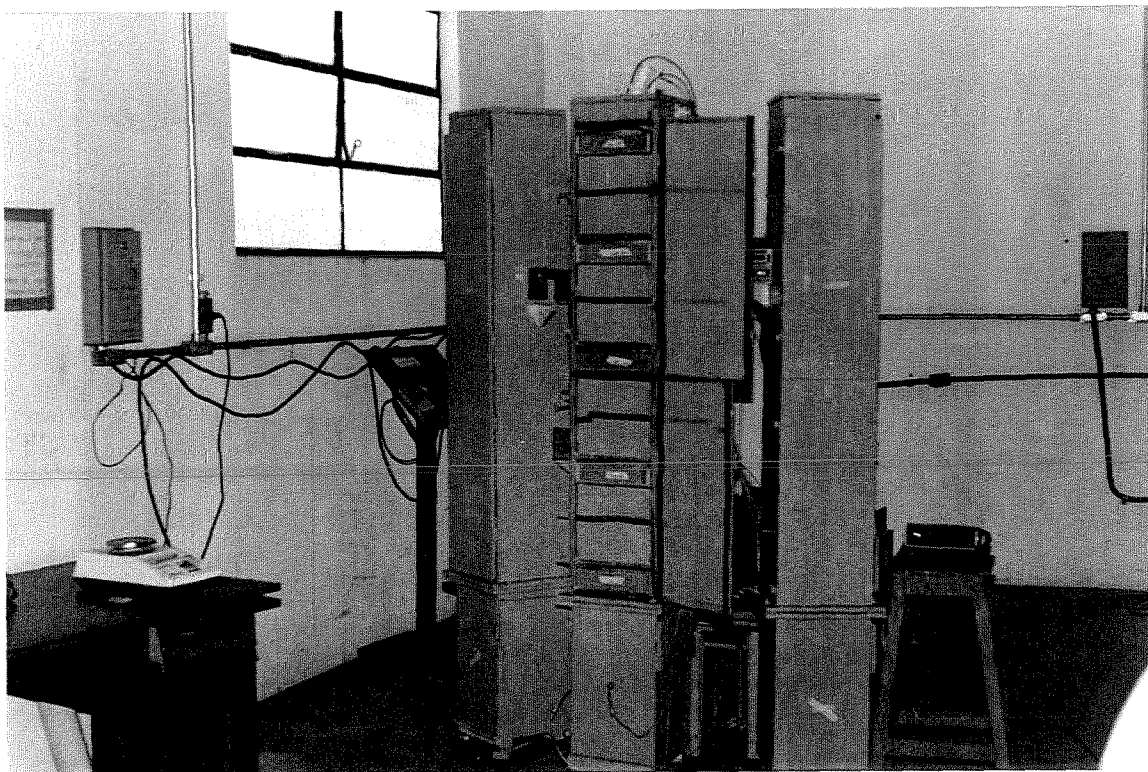


Figura 2 - Visão geral do sistema de secagem

#### 4.2.1.1. Sistema de circulação e aquecimento do ar.

O sistema é composto por ventilador, aquecedor e dutos. Foi utilizado um ventilador centrífugo, com pás voltadas para trás, conjugado com um motor de 1HP de potência e rotação de 3400 rpm. Antes dos testes de secagem, foi determinado a curva de eficiência do conjunto ventilador-motor. A conexão do ventilador com a câmara de secagem foi feita com um duto de madeira de secção quadrada, contendo um jogo composto por três resistências elétricas de 1000 W cada., ligadas em paralelo, protegidas por isolante térmico.

#### 4.2.1.2. Intervalos de leitura

As coletas de todos os dados foram realizadas no início de cada experimento, e de 30 em 30 minutos na primeira hora de secagem e após, a cada 45 minutos até o final do período de secagem.

#### 4.2.1.3. Temperatura e umidade do ar

A temperatura do ar de secagem foi controlada no plenum do secador, utilizando-se termopares ligados a um termostato, o qual, acionava as resistências para manter a temperatura de secagem estabelecida.

Os dados de temperatura na coluna de secagem bem como os de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido foram obtidos através de um registrador de sinais SPEEDOMAX, a partir de termopares de cobre-constantan, instalados sob cada bandeja móvel na coluna de secagem e na saída do ar de exaustão do secador, conforme Fig. 2. Os termopares foram previamente calibrados, e os resultados obtidos no experimento foram transformados nos seus valores reais correspondentes. A temperatura e umidade relativa ambiente foram obtidas através de um termohigrógrafo instalado próximo a entrada de ar no ventilador.

#### 4.2.1.4. Fluxo do ar.

O fluxo de ar, para fornecer a vazão requerida no experimento foi controlado na entrada de ar no ventilador por um dispositivo de madeira tipo comporta, e sua velocidade foi obtida através de um anemômetro com precisão de  $\pm 2\%$ , com leitura digital, na saída de ar do secador, a qual estava adequadamente ajustada ao diâmetro do anemômetro (10 cm). As leituras foram realizadas no início de cada operação, onde foram feitos os ajustes necessários e a cada coleta de dados, ao longo do desenvolvimento do processo de secagem.

#### 4.2. 1.5. Umidade do produto.

Os produtos foram amostrados de forma aleatória, 24 horas antes do início de cada teste de secagem e determinado a umidade inicial dos mesmos. A determinação da umidade do amendoim foi feita conforme o método ASAE S410T, enquanto que para o milho-pipoca foi utilizado o método de estufa com ventilação forçada a 105 ° C por 24 horas. Para a pesagem foi utilizado uma balança analítica com precisão de 0,0001 gramas. O valor da umidade inicial serviu como ponto de referência para o controle da umidade final na secagem dos produtos.

---

Antes de se iniciar o processo de secagem as bandejas mais o produto úmido foram pesadas em balança semi-analítica com precisão de 0,01 gramas, antes de serem colocadas no secador. A umidade dos produtos, durante o período de secagem, foi obtida pela diferença de peso dos produtos nas bandejas. A pesagem das bandejas foi feita quando o secador alcançava as condições de secagem estabelecidas em relação aos parâmetros temperatura e fluxo de ar e a partir daí, a cada coleta de dados. Esta operação continuou até que os produtos estivessem com teores de umidade na bandeja superior, de 10 % para o amendoim e 14 % para o milho-pipoca. Neste ponto as resistências foram desligadas e procedido o resfriamento do produto até que a temperatura da massa de grãos não fosse superior a 5 ° C da temperatura ambiente. No final de cada teste amostrou-se também de forma aleatória para o amendoim, e por bandejas para o milho-pipoca, para determinar o teor de umidade final dos produtos.

#### 4.2.1.6. Utilização de energia

A utilização da energia elétrica foi registrado por medidores de potência, através de wattímetros. Junto com os wattímetros foram instalados amperímetros para monitorar a intensidade de corrente elétrica incidente no sistema conforme Figura 3. Para registrar a

energia requerida pelo sistema de aquecimento foi utilizado um wattímetro, com capacidade 2400 watts e precisão de 0,1 watts. Em função da capacidade do aparelho ser inferior ao total de energia fornecida pelas resistências utilizou-se um transformador reduzindo para  $1/3$  o total de energia na entrada do wattímetro. Foram utilizados amperímetros com precisão de 0,2 amperes, trabalhando na faixa de 30 amperes para as resistências e de 10 amperes para o motor- ventilador, Fig 3.

Para monitorar a utilização de energia no conjunto motor-ventilador foi utilizado o método dos dois wattímetros MEDEIROS (1983) conforme Fig. 3, e a soma dos dois foi o valor do total de energia utilizada. As especificações dos aparelhos utilizados para leitura no motor foram as mesmas utilizadas no controle das resistências.

Os aparelhos utilizados no experimento apenas mostravam a quantidade de watts consumidos em determinado momento, tanto para as resistências como para o ventilador; não possuíam um sistema registrador, o qual pudesse fornecer o valor total acumulado no final de cada operação. Em vista disto foi necessário monitorar o tempo e energia utilizada durante o período de secagem . Como o conjunto motor-ventilador ficava ligado durante todo o processo de secagem, os cálculos ficaram facilitados (número de horas x quantidade de watts requeridos por hora).

As resistências elétricas não permaneceram ligadas durante todo o período de secagem, e o uso de energia se dava quando as mesmas estivessem funcionando. Para se obter o período total em que as resistências permaneciam ligadas, foram cronometrados 5 minutos a cada coleta de dados, e verificou-se quanto tempo as mesmas permaneciam ligadas para aquecer o ar de secagem. Tendo-se o período total e o valor médio que as resistências permaneceram ligadas em 5 minutos, por regra de três simples obteve-se o período total em horas de funcionamento do sistema de aquecimento.

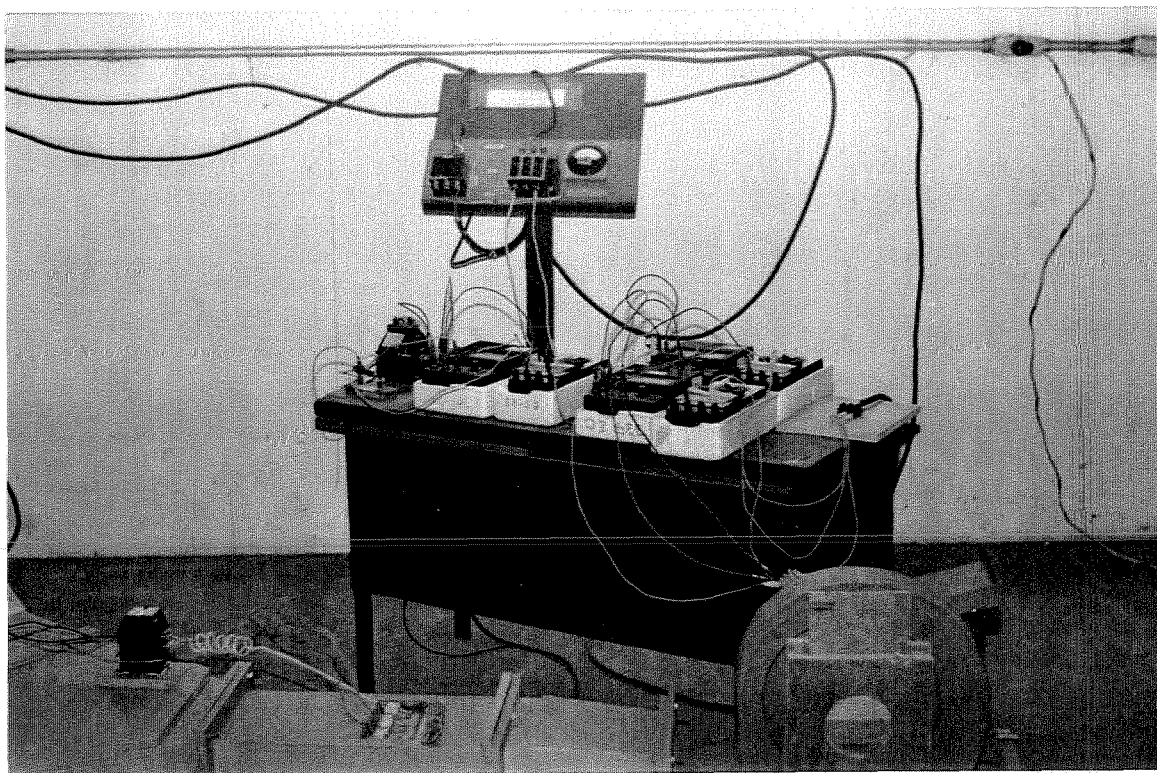


Figura 3 - Instrumentos utilizados na indicação do uso da energia elétrica durante os testes experimentais.

A unidade de medida obtida com os instrumentos foi watts, que para cálculo da eficiência energética foi transformado em MJ. A eficiência energética se deu pela avaliação do sistema como um todo e pelo requerimento específico de energia no processo de secagem propriamente dito. Utilizando-se para ambos MJ/kg de água evaporada.

O controle no consumo de energia foi realizado em três períodos distintos: uniformização, secagem e resfriamento. No período de uniformização, até o processo alcançar a temperatura de secagem pré-estabelecida, foi obtido o valor da potência elétrica utilizada pelo sistema de ventilação, mais o sistema de aquecimento do secador. No período de secagem foi contabilizado o requerimento de energia dos dois sistemas, ventilação mais aquecimento. No período de resfriamento foi contabilizado apenas o requerimento de energia do sistema de ventilação.

### 4.3. Qualidade dos produtos

#### 4.3.1. Amendoim

Na análise da qualidade do amendoim foram avaliados apenas aspectos externos do produto, como danificações de vagens e grãos. Para isto foi realizado uma análise prévia, antes da secagem e após, para cada tratamento. Foi amostrado de diversos pontos do secador 1 kg de amendoim para cada tratamento realizado. Desta amostra por divisões sucessivas obteve-se uma amostra de trabalho de 50 vagens cada. Analisou-se inicialmente a quantidade de vagens abertas no sentido longitudinal. Após esta observação, todas as vagens foram abertas e contados os grãos com cotilédones abertos e com película solta. Para esta condição, a avaliação se deu após todos os grãos terem passado por leve pressão entre os dedos. Da soma das duas amostras de 50 vagens cada, obteve-se o resultado final em porcentagens.

#### 4.3.2. Milho - pipoca

O milho-pipoca teve seus aspectos avaliados na coloração, trincas do pericarpo e no aspecto qualitativo mais importante que foi a capacidade de expansão. Os dados referentes a expansão do milho-pipoca foram obtidos por trabalho complementar realizado no período de 15 a 17 de março de 1995 com a variedade Mays Forte 1001.

O aspecto de grãos trincados foi obtido com amostragem nas bandejas 1, 3 e 5, das quais foram retiradas duas sub-amostras de 100 grãos cada, e com o auxílio de uma lupa, com capacidade de ampliação de 6 vezes, foram separados e contados os grãos que detinham uma ou mais trincas no seu interior e/ou exterior. Da média das 6 amostras obteve-se a quantidade de grãos trincados em porcentagem por tratamento.

O experimento complementar teve como objetivo avaliar a capacidade de expansão em função de diferentes tamanhos dos grãos do milho-pipoca e teor de umidade final do produto. Para isto, foram realizados sete tratamentos que consistiram na secagem de 300 gramas do milho-pipoca em estufa com ar forçado a uma temperatura de 50 ° C para cada tratamento. O milho-pipoca foi secado para sete diferentes teores de umidade final, na faixa de 15 até 9 %, com variação de 1 ponto percentual entre cada tratamento, com três repetições para cada condição, totalizando 21 testes.

Em relação ao tamanho dos grãos utilizou-se a peneira 15 para a classificação do milho-pipoca. Resultados preliminares indicaram a peneira 15 como a peneira média em relação ao milho-pipoca e este foi o parâmetro utilizado para a escolha da peneira. A avaliação da capacidade de expansão foi feita para os tamanhos maior e igual a peneira 15, menor que 15 e com o milho-pipoca sem passar pela classificação. Para cada condição, foram retiradas duas amostras de 100 grãos cada, onde foi avaliado a capacidade de expansão, conforme metodologia adotada por DALBELLO *et al.* (1995).

A metodologia consistiu na utilização de uma pipoqueira elétrica com ar forçado, com controle de temperatura através de termômetro comum (250 ° C). As amostras de 100 grãos foram pesadas em balanças semi analíticas com precisão de 0,01 gramas, sendo as mesmas colocadas na pipoqueira quando a mesma atingiu, após um período médio de 20 segundos, uma temperatura mínima de 180 ° C, e o pipocamento se completou no período de um minuto. O volume do milho-pipoca expandido foi obtido através de uma proveta de 500 cm<sup>3</sup>, graduada de 5 em 5 cm. A capacidade de expansão foi obtida pela relação entre o volume de 100 grãos e o seu peso antes da expansão, em cm<sup>3</sup> por grama.

#### 4.4. Procedimento experimental

Foram adotados os seguintes tratamentos para os dois produtos pesquisados, ou sejam:



- 3 níveis de temperaturas ( 40, 45 e 60 ° C )
- 3 fluxos de ar ( 12,5, 18 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> )
- 1 altura de camada de grãos ( 0,5 m ) e dois teores de umidade iniciais (16 e 22 %) para o milho-pipoca.
- 2 alturas de camada ( 0,5 e 1,0 m ), e teores iniciais de umidade variando de (18,5 a 12 %), para o amendoim.

Adotou-se os valores acima citados em função principalmente do secador ser de coluna com um sistema de secagem em camada fixa, o qual não é indicado usar temperaturas e camadas muito altas e também baseado na pesquisa bibliográfica. Em relação ao fluxo, foi estabelecido de forma que atendesse tecnicamente as recomendações de pelo menos um produto conforme citações bibliográficas, no caso o amendoim.

Foram realizados 23 testes com o amendoim e 18 com o milho-pipoca. Deste último, 9 testes com umidade inicial de 16 % e 9 com umidade inicial de 22 % . Em função da quantidade do produto disponível foi feito apenas um teste para cada tratamento.

#### 4.5. Análise estatística

Analisou-se estatisticamente através da análise da variância para um nível de significância estabelecido de 5 %. O teste para comparação de médias foi o teste de Tukey, também, com nível de significância de 5%. Para estas análises utilizou-se o pacote estatístico SANEST.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Considerações gerais

A apresentação dos resultados, análises e discussões foram feitas de forma separada para o amendoim e milho-pipoca. Os parâmetros analisados neste trabalho, para ambos os produtos, foram: curvas de secagem, uniformidade de secagem (gradiente de temperatura e umidade), taxa de secagem, potencial de secagem, eficiência energética, análise de custos e qualidade do produto final.

As análises estatísticas foram realizadas através da análise de variância, e teste Tukey para comparação de médias, a um nível de 5 % de significância. Os dados obtidos experimentalmente, para cada item analisado, foram, quando possível, ajustados a modelos não lineares para as variáveis de resposta dependentes de mais de um parâmetro de secagem e ou lineares para as variáveis de resposta dependentes de um fator somente. Os modelos não lineares abrangem os fatores; temperatura e fluxo de ar de secagem e altura de camada de 0,5 e 1,0 m para o produto amendoim, e, temperatura, fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial para o milho-pipoca, na faixa de 40 a 60 ° C, 12,5 a 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> e 16 a 22 %, respectivamente e altura de camada de 0,5 m.

### 5.2. Ventilador

Foi utilizado um ventilador centrífugo de pás voltadas para trás, acoplado no próprio eixo do motor de 1,0 c.v. Na determinação da curva de eficiência do conjunto, o melhor resultado obtido foi de 58,4 % , onde se conseguiu um fluxo de ar de 31,5 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>.

Nos testes experimentais realizados com o amendoim e milho-pipoca, o conjunto motor-ventilador trabalhou na faixa de 34,9 % a 50,5 % de eficiência , abaixo da faixa ideal de trabalho do conjunto, que seria de 50,5 a 58,4 % , onde o equipamento poderia fornecer um fluxo de ar de 25 a 45,5 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>. Os experimentos foram conduzidos, utilizando os fluxos de ar de 12,5, 18,0 e 25,0 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, com eficiência correspondente à 34,9, 41,0 e 50,5 %, respectivamente, Fig. 4.

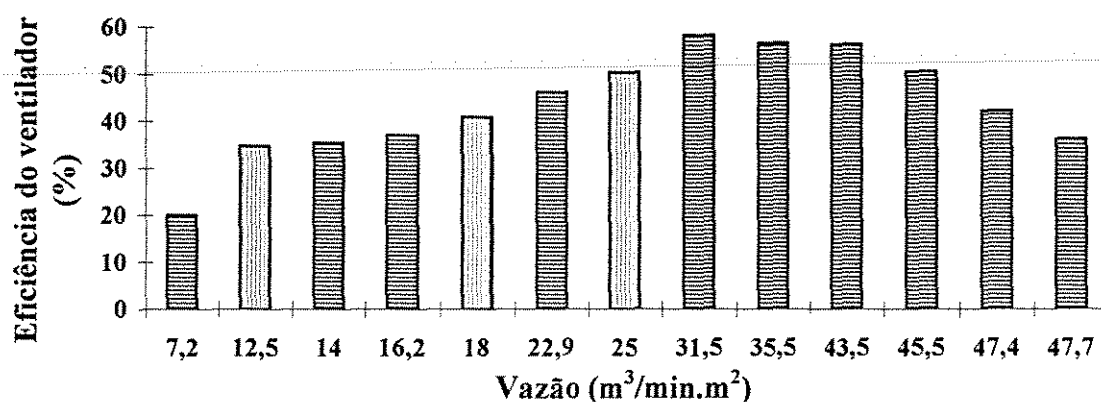


Figura 4 - Curva característica do ventilador e faixa de trabalho.

No desenvolvimento da fase experimental, as vazões escolhidas foram em função das características dos produtos e do próprio secador e não em função da faixa de melhor eficiência da curva do ventilador. Nem sempre é possível ajustar a faixa de maior rendimento do conjunto para todos os produtos que um secador pode receber. O importante é planejar o uso do equipamento para o principal produto a ser processado, considerando a sua quantidade e/ou o seu valor comercial. Trabalhando fora da faixa ideal, pode implicar em maiores custos com consumo de energia, ou mesmo sobrecarregar o equipamento, reduzindo assim a vida útil de funcionamento.

### 5.3. Produtos

Para os testes experimentais com o amendoim e milho-pipoca foram utilizados os mesmos níveis para os fatores, temperatura e fluxo de ar de secagem. As referências dos tratamentos foram feitas, conforme exemplos, 60/12,5/0,5 e 40/25,0/1,0, que significam: temperaturas de secagem de 60 e 40 ° C, fluxo de ar de 12.5 e 25,0 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> e alturas de camada de 0,5 e 1,0 m, respectivamente.

#### 5.3.1 - Amendoim

---

Nos testes experimentais realizados com o amendoim foi possível variar a altura de camada de 0,5 para 1,0 m em dois testes. Não foi realizado um maior número de testes em função de que o produto foi secando rapidamente no local de armazenamento, devido a aeração para preservar o produto associada com altas temperaturas registradas no período de trabalho. Isto fez com que os tratamentos fossem realizados com diferentes níveis do teor de umidade inicial. Foram realizados 23 testes de secagem utilizando 24 kg de amendoim para cada teste experimental.

##### 5.3.1.1. Condições ambientais e de trabalho na secagem do amendoim

Para cada teste experimental foram registradas a temperatura e umidade relativa do ar ambiente, sendo considerados os valores máximos, mínimos e médios obtidos durante o período de secagem para cada experimento realizado, conforme indicação nas Tabelas 2, 3. A Tabela 4 representa os valores médios da Tabela 2.

Tabela 2 - Condições ambientais, durante a realização dos testes experimentais com o amendoim, para teores de umidade iniciais variando de 18,5 a 12 %, altura de camada de 0,5 e 1,0 m, no período de 12 a 26/02/94.

Testes	Tratamentos	Temperatura do ar (° C)			Umidade relativa do ar (%)		
		máxima	média	mínima	máxima	média	mínima
01	60/12,5/0,5	26	25,5	25	90	85,0	80
02	60/12,5/0,5	29	26,4	25	78	76,7	72
03	60/18,0/0,5	32	30,6	29	69	60,6	52
04	60/18,0/0,5	34	32,4	31	49	47,5	45
05	60/18,0/0,5	32	31,9	30	48	47,0	46
06	60/25,0/0,5	28	26,5	26	72	77,6	76
07	60/25,0/0,5	31	29,4	28	77	66,4	62
08	60/25,0/0,5	31	30,7	30	65	58,7	55
09	45/12,5/0,5	30	29,6	29	66	52,4	60
10	45/12,5/0,5	28	26,5	26	80	78,0	76
11	45/18,0/0,5	32	31,3	30	60	57,3	52
12	45/18,0/0,5	28	27,5	27	84	80,3	78
13	45/25,0/0,5	33	30,7	29	66	55,7	48
14	45/25,0/0,5	26	25,6	25	90	88,0	86
15	40/12,5/0,5	32	30,0	28	72	55,8	60
16	40/12,5/0,5	31	28,8	26	80	55,5	60
17	40/12,5/0,5	26	25,6	25	90	84,0	80
18	40/18,0/0,5	32	32,2	28	78	62,0	50
19	40/18,0/0,5	30	29,4	28	75	67,4	64
20	40/25,0/0,5	28	25,7	25	78	77,3	74
21	40/25,0/0,5	30	27,1	25	79	73,0	64
22	40/25,0/1,0	31	30,0	27	80	60,4	58
23	40/25,0/1,0	31	28,5	26	84	75,6	67
<b>Média</b>		<b>30</b>	<b>28,7</b>	<b>27,3</b>	<b>74,4</b>	<b>67,1</b>	<b>63,7</b>
D. padrão		2,29	2,31	1,92	11,48	12,48	12,14
C. de v. (%)		7,61	8,02	7,03	15,40	18,61	19,07

Durante o período de 14 dias da fase experimental trabalhou-se com uma temperatura do ar ambiente média de 28,7 ° C, com um coeficiente de variação de 8,02 %. A maior variação entre as temperaturas máxima e mínima, no período de desenvolvimento dos testes foi de 5 ° C. Os dados registrados com a umidade relativa do ar, tiveram uma maior variação; no teste número 18 houve uma diferença de 28 pontos percentuais entre a umidade relativa máxima e a mínima. A umidade relativa média durante o período foi de 67,7 %, com um coeficiente de variação de 11,35 %, Tabela 2.

Tabela 3 - Resultados obtidos nos testes de secagem com o amendoim, para teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e altura de camada de 0,5 e 1,0 m.

Nº	Tratamentos	U.I. (%)	U.F. (%)	Período secagem. (h)	Resist. ligadas. (%)	Água retirada (kg)	Efi. da secagem (MJ/kg)	Efi. do sistema (MJ/kg)	Consumo ventilador (%)
01	60/12,5/0,5	12,5	8,8	1,58	76,0	0,97	12,2	15,6	21,8
02	60/12,5/0,5	15,0	9,1	3,42	67,3	1,58	12,8	16,8	23,8
03	60/18,0/0,5	15,0	9,5	2,33	71,1	1,46	11,0	14,4	24,3
04	60/18,0/0,5	15,0	10,4	2,00	73,0	1,23	10,9	14,2	23,2
05	60/18,0/0,5	15,0	11,4	1,70	70,6	0,98	11,6	15,2	23,0
06	60/25,0/0,5	15,0	9,9	1,17	85,5	1,36	8,8	12,3	28,5
07	60/25,0/0,5	15,0	10,0	1,50	76,3	1,33	8,1	11,2	27,7
08	60/25,0/0,5	15,0	9,5	1,17	76,9	1,46	7,3	10,2	28,4
09	45/12,5/0,5	12,0	9,0	1,83	27,3	0,53	8,5	15,1	43,7
10	45/12,5/0,5	13,0	9,6	3,00	40,0	0,90	11,8	17,7	33,3
11	45/18,0/0,5	12,0	9,3	2,30	26,0	0,71	6,9	13,2	47,7
12	45/18,0/0,5	13,0	9,6	2,50	28,8	0,90	7,7	12,8	39,8
13	45/25,0/0,5	15,0	10,6	3,67	40,3	1,18	10,8	16,5	34,5
14	45/25,0/0,5	12,0	9,3	1,25	56,0	0,71	8,6	12,7	32,3
15	40/12,5/0,5	14,0	10,4	4,00	27,5	0,96	9,1	16,9	46,2
16	40/12,5/0,5	13,0	9,8	5,55	19,8	0,85	10,0	19,6	48,9
17	40/12,5/0,5	12,0	9,5	2,88	27,1	0,66	10,5	18,0	41,7
18	40/18,0/0,5	12,0	10,3	3,00	20,0	0,45	11,0	22,0	50,0
19	40/18,0/0,5	12,0	9,3	3,40	22,1	0,71	8,9	17,6	49,4
20	40/25,0/0,5	18,0	9,8	4,75	23,2	2,18	4,9	9,2	46,7
21	40/25,0/0,5	16,7	10,4	4,30	23,3	1,69	5,9	10,8	50,0
22	40/25,0/1,0	18,5	9,2	10,0	21,0	4,92	3,7	7,1	47,9
23	40/25,0/1,0	18,0	11,0	9,0	17,0	3,78	3,6	7,6	52,6

Com o objetivo de facilitar as análises e discussões dos resultados e melhorar a apresentação gráfica, os dados foram agrupados em valores médios para os testes desenvolvidos nas mesmas condições experimentais de temperatura e fluxo de ar de secagem do produto, conforme Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Valores médios de temperatura e umidade relativa ambiente, registrados durante os testes experimentais com o amendoim, para umidade inicial variando de 18,5 a 12 %, altura de camada de 0,5 e 1,0 m, no período de 12 a 26/02/94.

Tratamentos	Temperatura do ar (° C)			Umidade relativa do ar (%)		
	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima
60/12,5/0,5	29	25,9	25	90	80,9	72
60/18,0/0,5	34	31,4	29	69	51,7	45
60/25,0/0,5	31	28,9	26	78	67,6	62
45/12,5/0,5	30	29,4	26	80	65,2	64
45/18,0/0,5	32	29,4	27	84	68,8	52
45/25,0/0,5	33	28,2	26	90	71,8	48
40/12,5/0,5	32	28,4	26	90	65,1	60
40/18,0/0,5	32	29,8	28	78	64,7	50
40/25,0/0,5	30	26,4	25	79	75,2	63
40/25,0/1,0	31	29,2	26	84	68,0	58
<b>Média</b>	<b>31,4</b>	<b>28,6</b>	<b>26,4</b>	<b>82,2</b>	<b>67,7</b>	<b>57,4</b>
D.Padrão	1,59	1,60	1,26	6,77	7,68	8,45
C. de v. (%)	5,06	5,58	4,79	8,24	11,35	14,72

Tabela 5 - Resultados médios dos experimentos realizados com o amendoim, para teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e alturas de camada de 0,5 e 1,0 m.

Tratamentos	U.I (%)	U.F (%)	Período secagem (h)	Resistênc. ligadas (%)	Água retirada (kg)	Efi. da secagem (MJ/kg)	Efi. do sistema (MJ/kg)	Consumo ventilador (%)
60/12,5/0,5	13,8	8,9	2,50	71,7	1,28	12,5	16,2	22,8
60/18,0/0,5	15,0	10,4	2,01	72,9	1,22	11,2	14,6	23,5
60/25,0/0,5	15,0	9,8	1,28	78,6	1,38	8,1	11,2	28,2
45/12,5/0,5	12,2	9,3	2,40	33,7	0,71	10,2	16,1	38,5
45/18,0/0,5	12,5	9,4	2,40	27,0	0,80	7,3	13,0	43,8
45/25,0/0,5	13,5	9,9	2,50	48,2	0,94	9,7	14,6	33,4
40/12,5/0,1	13,0	9,9	3,80	24,8	0,92	9,9	18,2	45,6
40/18,0/0,5	12,0	9,8	3,20	22,7	0,58	10,1	19,8	49,7
40/25,0/0,5	17,4	10,1	4,50	23,3	1,94	5,2	10,0	49,0
40/25,0/1,0	18,3	10,1	9,50	19,0	4,35	3,7	7,4	50,3

Os valores da umidade final (U.F.) observados na Tabela 5, são valores médios da coluna de secagem, e a umidade inicial (U.I.) foi a umidade em que o produto entrou no secador. Os demais dados serão analisados e discutidos nos próximos itens.

### 5.3.1.2. Secagem

Nesta seção foram analisados e discutidos os resultados referentes aos itens curvas de secagem, gradiente de umidade e temperatura, potencial de secagem, período de secagem e funcionamento das resistências elétricas, período de resfriamento, energia utilizada pelo ventilador, eficiência do processo de secagem e custos de secagem.

#### 5.3.1.2.1. Curvas de secagem

As Fig. 5 e 6 mostram o comportamento da coluna de secagem em diferentes alturas da massa do produto, para os tratamentos 40/25/0,5 e 40/25/1,0 m, com altura da camada de 0,5 e 1,0 m respectivamente. A última hora representada nas duas curvas de secagem, é relativa ao período de resfriamento do produto. A escolha se deu em função da possibilidade de se comparar dois tratamentos realizados nas mesmas condições experimentais mas com variação da altura de camada.

Na Fig. 5, todas as bandejas, de 1 até a 5 começaram a perder água a partir do primeiro instante da secagem, não havendo transferência de umidade de uma bandeja para outra. Isto demonstra que o ar não estava saindo saturado e mantinha ainda um grande potencial de secagem.

Na Fig. 6, com 1,0 metro de altura de camada, as bandejas de 1 até a 4 também iniciaram a redução do teor de umidade desde o início da secagem e transferiram umidade para a última bandeja até o final da primeira hora.

No tratamento 40/25/0,5, representado pela Fig. 5, retirou-se 7,7 pontos percentuais de umidade em 5 horas, ou seja, 1,54 pontos por hora, contra 1,22 pontos por hora da Fig. 6. Isto representa uma redução de 20,1 % por hora de secagem, quando se utilizou a altura da coluna de secagem de 1,0 m. Uma explicação possível para esta redução, é a própria altura da camada de produto, fazendo com que o ar saia da massa de grãos com mais de 90% de umidade e permanecendo assim até o final da terceira hora, enquanto que a 0,5 m



de altura, no final da segunda hora, o ar sai do secador com pouco mais de 60 % de umidade relativa, mantendo um grande potencial de secagem.

Nas últimas 5 horas, para a camada de 1,0 m de altura, Fig. 6, o processo de secagem retirou apenas 3,6 pontos percentuais de umidade, retirando em valores médios, 0,72 pontos por hora, o que representa 40,1 % menos por hora de secagem se comparado com as primeiras 5 horas. A maior dificuldade de migração da umidade do centro do grão até a superfície e a umidade de equilíbrio podem justificar este fato. Com 30 minutos iniciais o processo de secagem conseguiu retirar 0,9 kg de água do amendoim, enquanto que na última hora foram retirados apenas 0,2 kg de água. Na Fig. 7 a maior quantidade de água foi retirada no período entre a primeira e segunda hora de secagem, com 0,65 kg de água.

As Fig. 5 e 6 mostram que no final do processo de secagem o produto sai do secador com diferentes teores de umidade e diferentes temperaturas da massa de grãos, sendo uma das características negativas do sistema de secagem em camadas fixas. A falta de uniformidade de secagem neste tipo de sistema é muito grande, implicando na necessidade de resfriar e misturar de forma adequada o produto antes de ser embalado e/ou armazenado.

#### 5.3.1.2.1.1. Período de resfriamento.

O resfriamento é uma etapa imprescindível para que se possa armazenar o produto adequadamente. Nesta etapa ainda se retira parte da umidade do produto, utilizando apenas a energia do motor mais ventilador e aproveitando o calor latente da massa de grãos. Esta combinação pode reduzir os custos e melhorar a eficiência de secagem.

Outro aspecto importante do resfriamento foi o de reduzir ao máximo o gradiente de temperatura na coluna de secagem. Esta operação deve ser efetuada, principalmente onde as unidades armazenadoras não estão dotadas com sistemas de aeração. A condição de produto seco e frio é a situação ideal para qualquer produto que se queira armazenar com qualidade. Nas Fig. 5 e 6 foram retirados 0,52 e 0,66 pontos percentuais de umidade, respectivamente, no período de resfriamento do produto

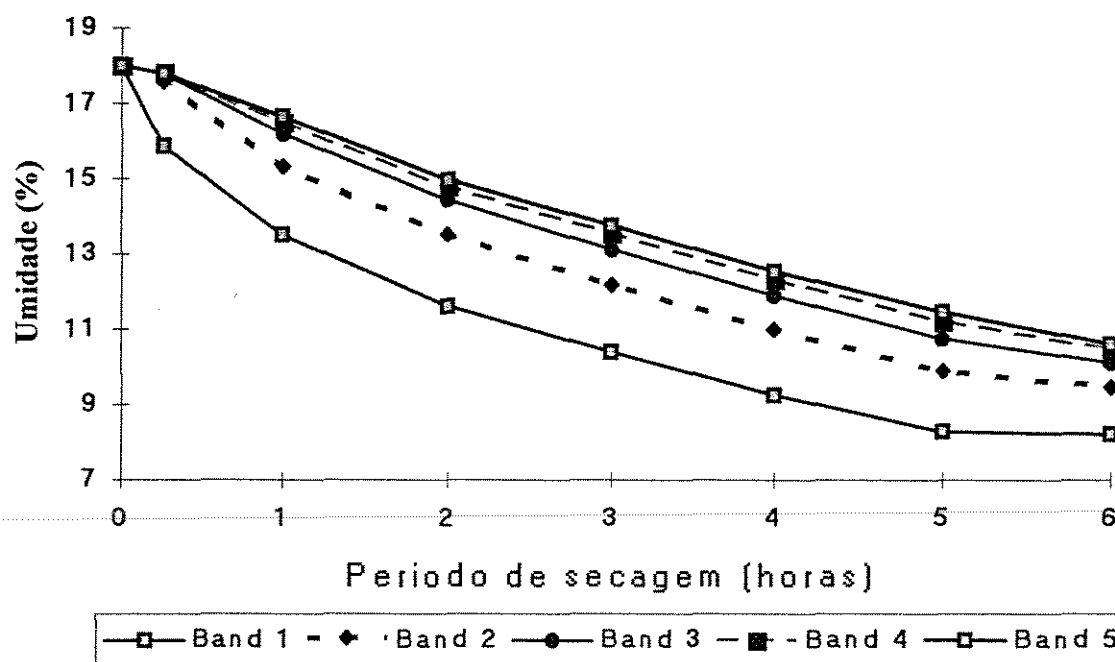


Figura 5 - Curvas de secagem do amendoim com o tratamento 40/25/0,5 e umidade inicial de 18 %, e 0,5 metros de altura da camada.

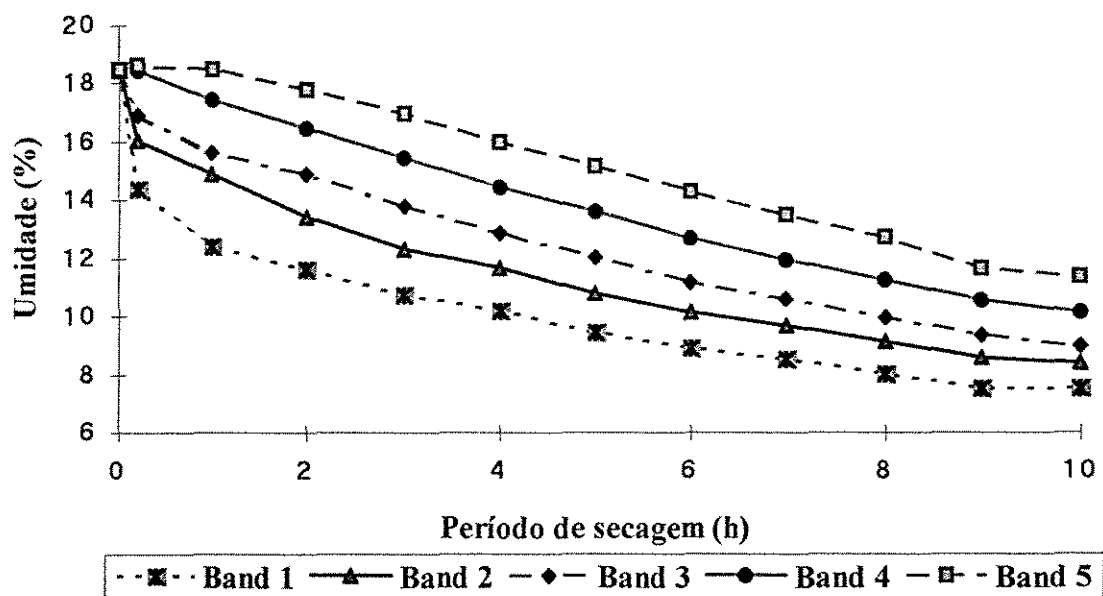


Figura 6 - Curvas de secagem do amendoim com o tratamento 40/25/1,0, umidade inicial de 18,5 %, e 1,0 metro de altura da camada.

#### 5.3.1.2.2. Gradientes de temperatura e umidade

Nos dados de gradiente de temperatura foram considerados os valores máximos e mínimos da temperatura na coluna de secagem, antes do resfriamento do produto. No gradiente de umidade foi considerado a diferença entre a umidade do produto da bandeja superior com a bandeja inferior, após conclusão do processo de secagem incluindo o resfriamento.

##### 5.3.1.2.2.1. Gradiente de umidade

---

Comparando as curvas de secagem das Fig. 5 e 6, num mesmo instante durante o período de secagem; 5 horas, observa-se que o gradiente de umidade na Fig. 5 estava em 3,17 %, e, baixou para 2,39 até o final do período de resfriamento do produto (6 horas), sendo o teor médio de umidade final de 9,8 %, enquanto que na Fig. 6, com o mesmo período de tempo de secagem o gradiente de umidade foi de 5,71 %, e reduziu para 3,8 % até o final do resfriamento do amendoim (10 horas), com um teor de umidade média final de 9,2 %.

As Fig. 5, 6 e 7, mostram que com o passar do tempo, durante o processo de secagem, o gradiente de umidade diminui, fato este, em função da propriedade que os grãos possuem de entrar em equilíbrio com ar que circula ao seu redor, com determinada temperatura e umidade relativa. O maior gradiente de umidade está relacionado com a maior quantidade de água retirada do produto por período de secagem e ocorre na fase inicial de secagem conforme Fig. 7 .

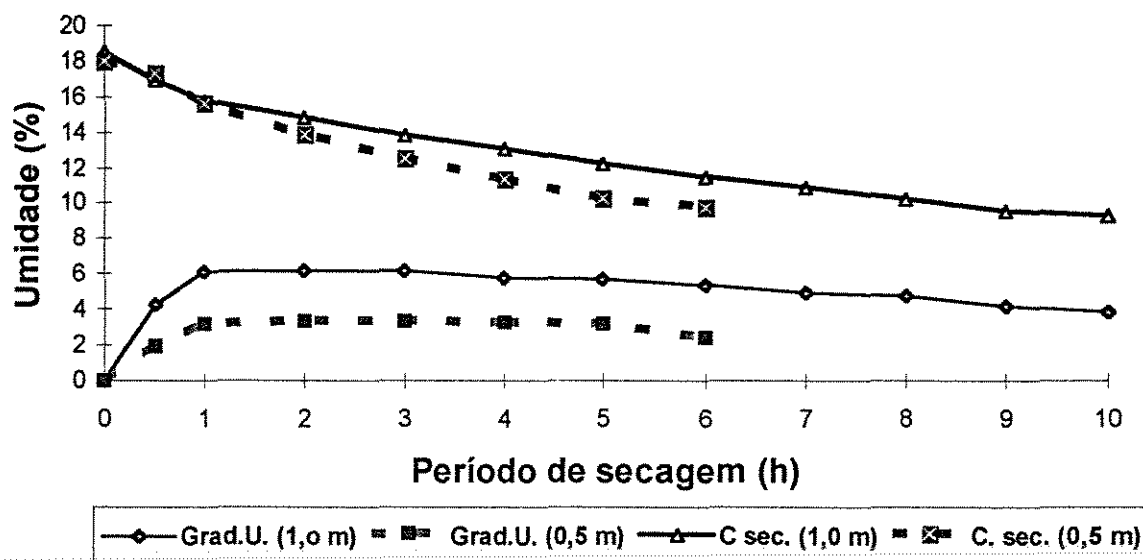


Figura 7 - Relação entre as curvas médias de secagem e o gradiente de umidade com o amendoim, para os tratamentos 40/25/1,0 e 40/25/0,5; testes 20 e 22 da Tabela 3.

Houve uma tendência de redução do gradiente de umidade quando se aumentou o fluxo de ar de secagem, mantendo-se a temperatura constante, Fig. 8, concordando com BROOKER *et al.* (1992) e DALPASQUALE (1994). O gradiente de umidade nos tratamentos 40/25/0,5 e 40/25/1,0 não mantiveram a mesma tendência que os demais tratamentos em função de dois fatores muito relevantes; maior teor de umidade inicial, 18,0 e 18,5 % respectivamente, e maior altura de camada (1,0 m) no tratamento 40/25/1,0. Isto fez com que o período de secagem do produto fosse muito maior que nos demais tratamentos, (Tabela 5), acarretando uma secagem maior na camada inferior, aumentando o gradiente de umidade.

Para os testes realizados, a análise de variância, mostrou que os fatores, temperatura (40, 45 e 60 ° C) e fluxo de ar de secagem (12,5, 18,0 e 25,0 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>), para altura de camada de 0,5 m não foram significativos em relação a variável gradiente de umidade na coluna de secagem do amendoim. Considerando para esta variável de resposta, as médias estatisticamente iguais. Uma das possibilidades para que isso tenha ocorrido, é creditada aos diferentes teores iniciais de umidade com que foram desenvolvidos os testes experimentais.

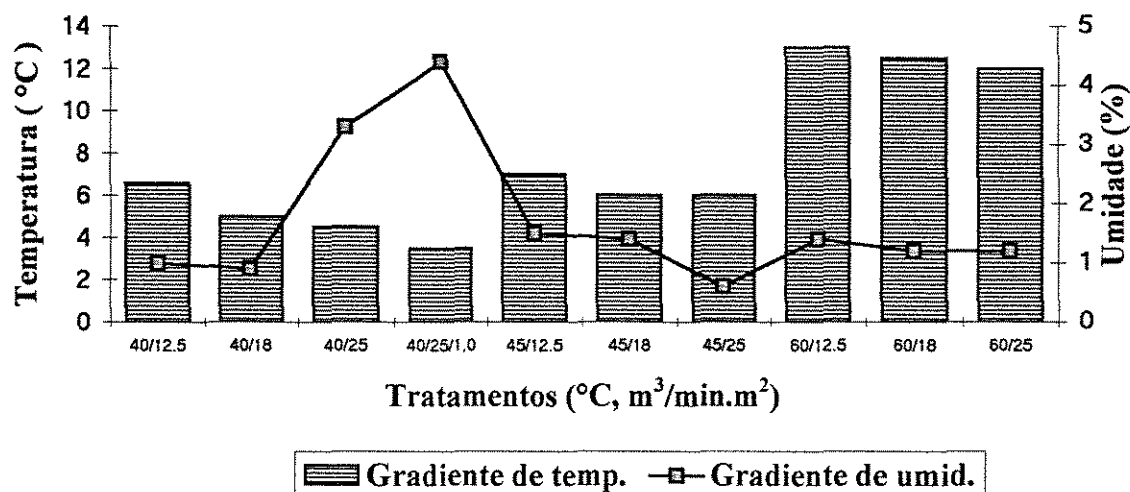


Figura 8 - Gradientes finais de temperatura e umidade na coluna de secagem com o amendoim, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m, e teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 %

#### 5.3.1.2.2.2. Gradiente de temperatura

O gradiente de temperatura do amendoim na coluna de secagem foi significativamente influenciado pela temperatura e fluxo do ar de secagem. O maior gradiente, 13 ° C, foi obtido com a maior temperatura e menor fluxo de ar, ou seja o tratamento 60/12.5/0,5, e o menor gradiente de temperatura, 3,5 ° C, foi obtido com a menor temperatura e maior fluxo de ar, com o tratamento 40/25/1,0. Os valores médios dos gradientes, para as temperaturas de 40 e 45 ° C e fluxos de 18 e 25 m³/min.m², foram estatisticamente iguais.

O gradiente de temperatura na coluna de secagem do amendoim aumentou, quando se aumentou a temperatura do ar de secagem. Para uma mesma temperatura o gradiente de temperatura diminuiu quando se aumentou o fluxo de ar de secagem, conforme Fig. 8. Este aspecto ilustra a necessidade de resfriar a massa de grãos antes de passar por processos de embalagem ou armazenamento. Massas de grãos armazenadas com diferentes níveis de temperaturas podem desencadear facilmente no processo de deterioração do produto, podendo ocasionar grandes prejuízos nas unidades armazenadoras, em função da

necessidade de movimentação do produto, ou mesmo pelas perdas de quantidade e qualidade do produto.

#### 5.3.1.2.3. Potencial de secagem

A umidade relativa do ar de exaustão foi obtida a partir dos dados de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, registrados na saída do ar do secador.

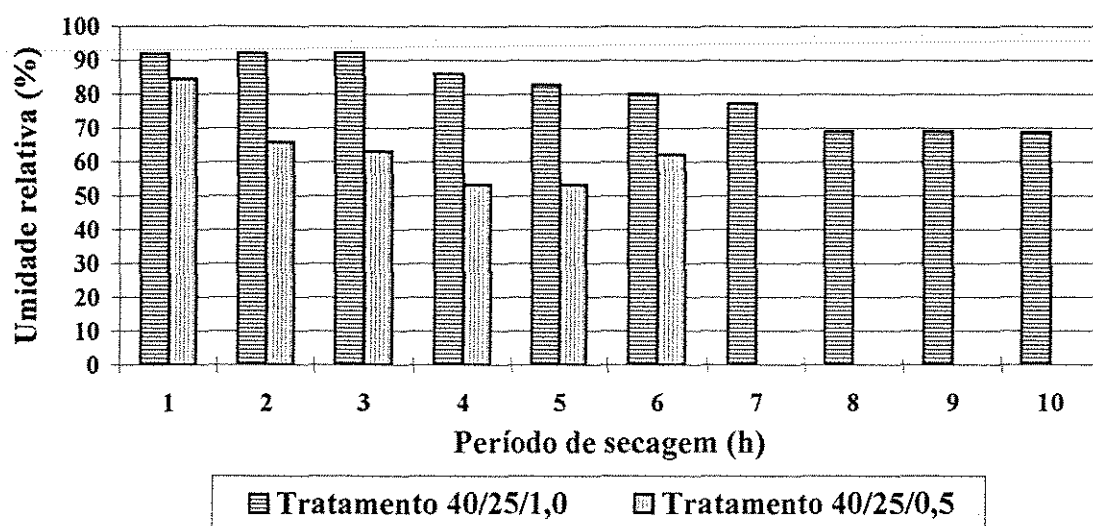


Figura 9 - Condições do ar de secagem na saída do secador, para alturas de camada de 0,5 e 1,0 m, com os tratamentos 40/25/1,0 e 40/25/0,5.

A altura de camada influenciou significativamente no processo de secagem, nos seus diversos parâmetros, taxa de secagem, uniformidade de secagem, eficiência energética. Observando-se a Fig. 9, é possível verificar que mesmo com altura de camada de 1,0 m, nas condições em que foram desenvolvidos os experimentos, o ar não saiu saturado. Ocasionalmente um leve aumento da umidade até a terceira hora, passando de 91,9 para 92,3 % e reduzindo gradativamente para 70 % até o final do período de secagem.

Na comparação com a camada de secagem a 0,5 m de altura, o processo de secagem a 1,0 m é muito mais eficiente no aproveitamento do potencial do ar de secagem. Com 0,5 m a perda foi muito maior em relação a energia fornecida ao ar de secagem, pois

no primeiro instante o ar sai do secador com 84,6 % de umidade relativa, mantendo ainda um bom potencial de secagem, passando para 65,9 % já no início da segunda hora de secagem. Nas últimas duas horas utiliza apenas 50 % do potencial total. O acréscimo da umidade relativa que houve no final do processo de secagem para 0,5 m de altura de camada, foi devido ao período de resfriamento.

O ar de exaustão na coluna de 1,0 m, conforme mostra a Fig. 9, saiu muito mais úmido durante todo o período de secagem, tornando o processo mais eficiente energeticamente.

---

#### 5.3.1.2.4. Taxa de secagem do amendoim

Nas condições em que foi executado o experimento, onde os teores de umidade iniciais foram diferentes, torna-se mais difícil avaliar o efeito dos tratamentos na velocidade de secagem. Em função disto foi transformado a quantidade de água retirada em cada tratamento para uma mesma unidade, quilograma de água retirada por hora de secagem, ( kg/h).

Com o aumento da temperatura e do fluxo de ar de secagem, houve uma tendência de aumento na taxa de secagem, o que concorda com DALPASQUALE (1984) e LASSERAN (1978). A análise da variância, mostra que apenas o fator temperatura influenciou significativamente na taxa de secagem. As temperaturas 45 e 60 ° C foram as que obtiveram as maiores taxas de secagem, sendo que os seus valores médios foram estatisticamente iguais, diferenciando-se da temperatura de 40 ° C, Fig. 10.

A maior taxa de secagem foi obtida com o tratamento 60/25/0,5 e umidade inicial de 15 %, onde foram retirados 1,07 kg de água por hora, 5,9 vezes a mais que o tratamento 40/18/0,5 e umidade inicial de 12 %, que retirou 0,18 kg/h.

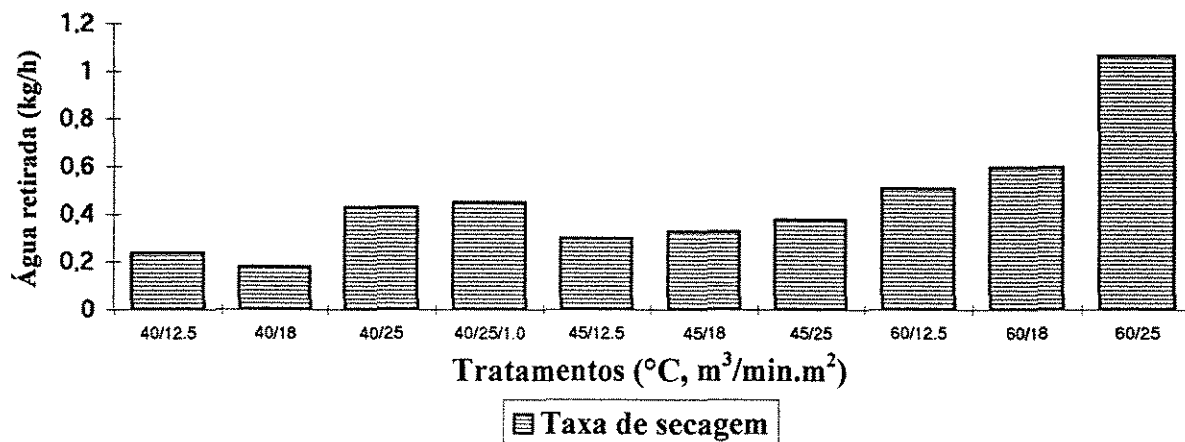


Figura 10 - Taxa média de secagem do amendoim, kg/h de água retirada no processo de secagem, para teores iniciais de umidade variando de 18,5 a 12 % e altura da camada de 0,5 e 1,0 m.

A velocidade de secagem tem que ser compatível com a qualidade do produto final. As exigências são diferenciadas de produto para produto e mesmo de variedade para variedade dentro de uma mesma espécie. A sua adequação requer conhecimento dos aspectos envolvidos no processo de secagem.

#### 5.3.1.2.5. Período de secagem e funcionamento das resistências.

A Fig. 11 relaciona em valores médios para cada teste experimental, o período em que as resistências elétricas permaneceram ligadas para manter a temperatura do ar de secagem com o período total para completar o processo de secagem.

O período total de secagem manteve a tendência de redução, à medida que se aumentou a temperatura do ar de secagem. Na temperatura de 45° C, para todos os fluxos e 60° C nos fluxos de 12,5 e 18 m³/min.m², o período de secagem permaneceu praticamente constante. Há de se considerar que os testes não foram desenvolvidos com o mesmo teor de umidade inicial, em todos os tratamentos como mostra a Tabela 5. As condições



ambientes de temperatura e umidade relativa não tiveram variação significativa durante os testes de secagem, ( Tabela 4).

Os tratamentos com temperaturas e/ou fluxos de ar maiores podem ter períodos idênticos de secagem aos tratamentos com temperatura e/ou fluxos de ar menores, em função do maior teor de umidade inicial do produto.

A análise estatística mostra que no período total de secagem apenas o fator temperatura foi significativo, e a temperatura de 40 ° C foi a que proporcionou o maior período de secagem, sendo 5,55 horas para o tratamento 40/12,5/0,5 e 10 horas para o tratamento 40/25/1,0, as médias do período de secagem para as temperaturas de 45 e 60 ° C foram estatisticamente iguais.

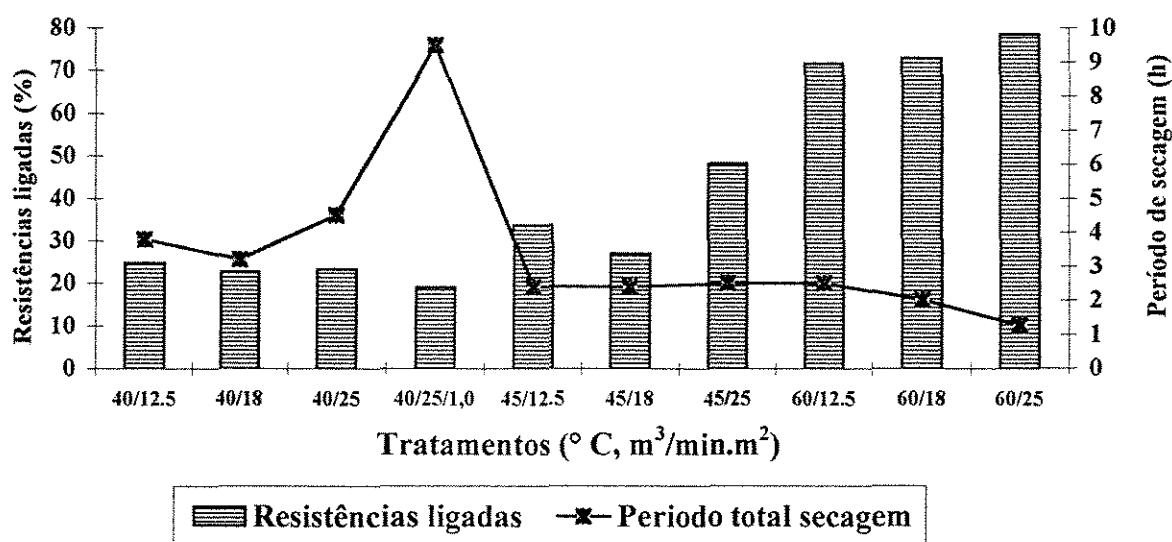


Figura 11- Relação entre o período total de secagem e período em que as resistências permaneceram ligadas para os testes realizados com o amendoim .

O fluxo e a temperatura do ar de secagem, influenciaram no período em que as resistências permaneceram ligadas para manter a temperatura estabelecida para cada tratamento, em relação ao período total de secagem, Fig. 11. A análise estatística mostra que a temperatura de 60 ° C foi a que requereu maior tempo das resistências ligadas para aquecer o ar de secagem, vindo em ordem decrescente as temperaturas de 45 e 40 ° C. O

fluxo de  $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ , foi o que mais influenciou na relação resistências ligadas e período total de secagem, sendo que os fluxos de  $12,5$  e  $18,0 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ , foram estatisticamente iguais.

No tratamento (60/25/05), Fig. 11, as resistências permaneceram ligadas durante 78,6 % do período total de secagem, enquanto que para o tratamento (40/18/0,5), o tempo de permanência das resistências ligadas se resumiu a 22,7 % do tempo de secagem. Isto se reflete no maior consumo de energia. Para uma mesma temperatura, o aumento do fluxo de ar aumentou o tempo de permanência das resistências ligadas, fato este, relativo ao maior volume de ar a ser aquecido no mesmo intervalo de tempo.

---

#### 5.3.1.2.6. Energia utilizada pelo ventilador

Na energia utilizada pelo ventilador, para movimentação do ar de secagem, considerou-se o percentual de energia utilizada por quilograma de água retirada (MJ/kg), do total de energia utilizada pelo sistema de secagem (MJ/kg).

Na análise da variância, apenas o fator temperatura foi estatisticamente significativo na relação da energia utilizada pelo ventilador com a requerida pelo sistema de secagem. A temperatura de  $40^\circ \text{C}$  foi a que proporcionou a maior utilização de energia por quilograma de água retirada, pelo conjunto motor-ventilador. Esta relação diminuiu com o aumento da temperatura do ar de secagem, Fig. 12

A energia utilizada pelo conjunto (motor-ventilador), foi tanto maior quanto menor foi a temperatura do ar de secagem utilizada. Para um mesmo fluxo de ar ( $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ ), o consumo de energia diminuiu com o aumento da temperatura, sendo 49,0, 33,4 e 28,2 % do total da energia requerida pelo sistema, quando se utilizou temperaturas de 40, 45 e  $60^\circ \text{C}$  respectivamente.

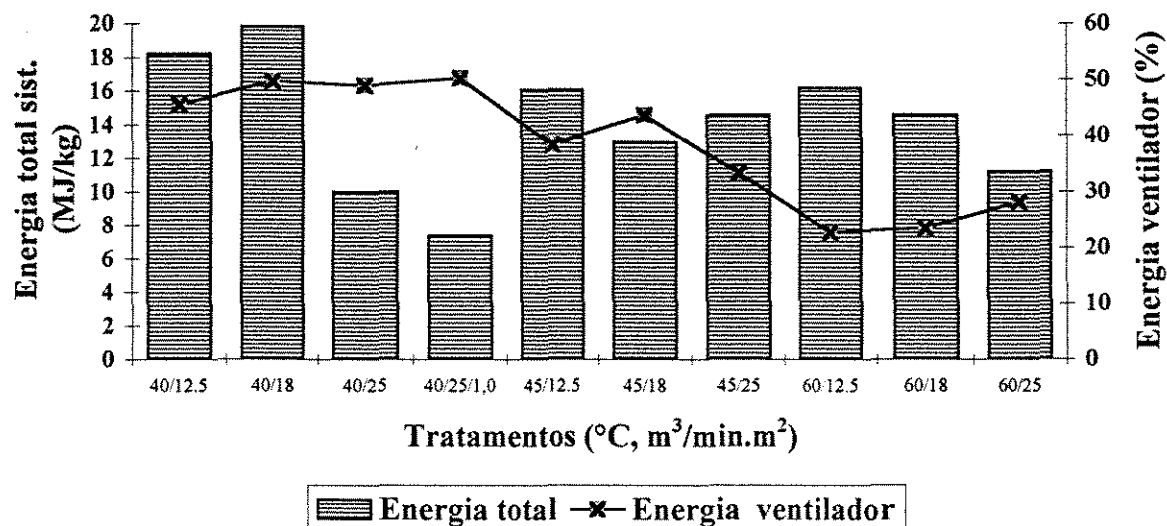


Figura 12 - Relação entre a energia total requerida pelo sistema de secagem e a requerida pelo ventilador, por kg de água evaporada, com o amendoim, para alturas de camada de 0,5 e 1,0 m.

Este fato demonstra o quanto é importante o planejamento correto, tanto dos equipamentos a serem utilizados como dos parâmetros: temperatura, fluxo de ar e altura de camada, máximos ou mínimos requeridos para os diferentes tipos de produtos a serem secados. Em sistemas com baixas temperaturas de secagem, o ventilador é um dos principais fatores de consumo de energia durante o processo de secagem, principalmente, quando a eficiência do conjunto é baixa, como mostra a Fig. 4, onde a máxima eficiência do conjunto motor-ventilador foi de 58,4 %.

#### 5.3.1.2.7. Eficiência do processo de secagem do amendoim

Na eficiência do processo de secagem considerou-se dois aspectos: energia requerida na secagem e energia requerida pelo sistema de secagem. No requerimento da energia para a secagem considerou-se apenas a fonte de aquecimento do ar, enquanto que para o sistema, considerou-se também a energia para a movimentação do ar (motor-ventilador), em MJ/kg de água evaporada.

Dentro da faixa de temperaturas e fluxos de ar de secagem pesquisados no experimento, a análise de variância mostrou que a interação foi significativa entre os fatores temperatura e fluxo de ar de secagem, em relação as variáveis "eficiência de secagem e eficiência do sistema de secagem".

Para a eficiência de secagem, a temperatura de 40 ° C e fluxo de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, foi a combinação que obteve a melhor eficiência energética de secagem, enquanto que nas temperaturas de 40 e 60 ° C e para os fluxos de 12,5 e 18 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, a eficiência de secagem foi estatisticamente igual. A eficiência de secagem manteve uma tendência de diminuir a medida que se aumentou a temperatura do ar de secagem e melhorar quando se aumentou o fluxo de ar de secagem, Fig. 13.

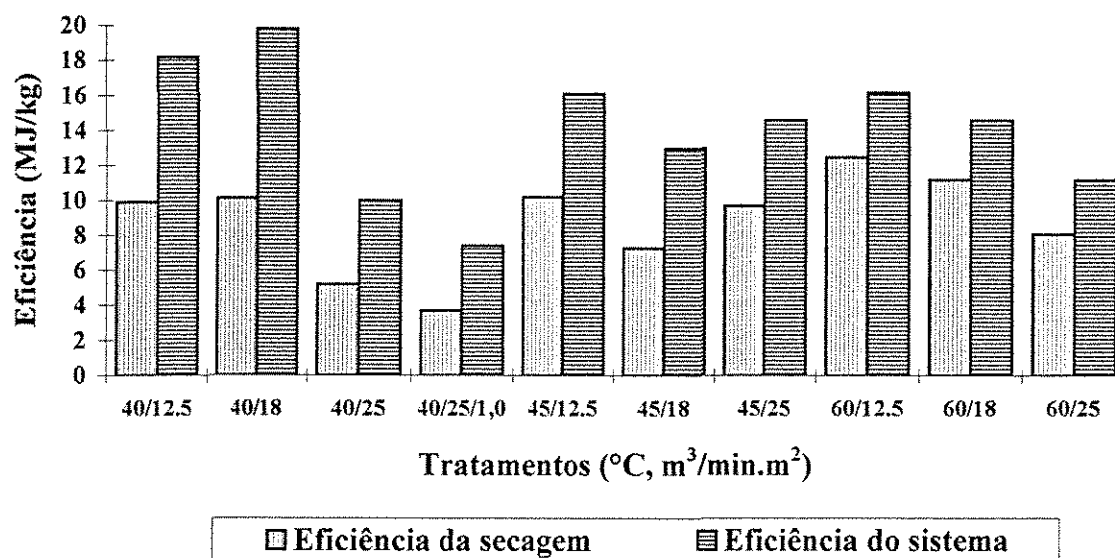


Figura 13 - Eficiência energética de secagem e eficiência do sistema de secagem, em relação a energia requerida, com o amendoim, e altura da camada de 0,5 e 1,0 m.

Em relação a temperatura e fluxo de ar de secagem, esta tendência, não está de acordo com BAKKER-ARKEMA *et al.* (1978), NELLIST (1987), BROOKER *et al.* (1992) e BAKKER *et al.* (1993), os quais afirmam que com o aumento do fluxo e redução da temperatura do ar de secagem, o requerimento de energia é maior. No entanto, trabalharam

em condições diferentes das utilizadas no experimento, como; produto, fluxo contínuo de produto e altas temperaturas de secagem. Na faixa de 40 a 60 ° C, temperaturas em que foram realizados os testes experimentais, os dados encontrados estão de acordo com YOUNG & DICKENS (1975), WALKER & BAKKER-ARKEMA (1978) MARTINS & STROSHINE (1993). No experimento realizado, a velocidade de secagem proporcionada pelo maior fluxo de ar compensou a energia requerida para o seu aquecimento.

Na eficiência do sistema de secagem, o teste Tukey para médias de temperatura, dentro dos níveis 12,5 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> do fator fluxo, foram estatisticamente iguais. Dentro do fluxo 18 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, as temperaturas 45 e 60 ° C foram as que obtiveram os melhores resultados, e diferiram da temperatura de 40 ° C. A melhor eficiência do sistema foi obtida com o fluxo de ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, sendo que os fluxos de 12,5 e 18 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, foram estatisticamente iguais.

A eficiência do sistema de secagem tende a melhorar com o aumento da temperatura, o que está de acordo com BAKKER -ARKEMA et al. (1978), SILVA et al. (1983), MILLER & WHITFIELD (1984), NELLIST (1987), BAKER et al. (1993). Esta tendência se deve a princípio a energia requerida pelo ventilador para movimentação do ar. O aumento de temperatura reduziu o período de secagem e conseqüentemente, menor tempo de funcionamento do ventilador.

Com altura de camada de 0,5 m, o tratamento mais eficiente foi o 40/25/0,5, conforme Fig. 13, onde foi obtido um valor de energia requerida de 5,2 MJ/kg de água evaporada para a secagem propriamente dita e 10,0 MJ/kg para o sistema como um todo. Variando altura de camada para 1,0 m, melhorou de forma significativa a eficiência do processo de secagem em relação da energia requerida, obtendo-se 3,7 e 7,4 MJ/kg de água evaporada para a eficiência energética de secagem e o sistema de secagem.

Conforme Fig. 13, têm-se uma demanda muito grande de energia por parte do ventilador quando utilizado com temperaturas baixas, o que tornou o sistema menos eficiente com os tratamentos 40/12,5/0,5 e 40/18/0,5, requerendo um total de energia de 18,6 e 19,7 MJ/kg de água evaporada respectivamente.

De maneira geral, com altura de camada de 0,5 m o processo de secagem foi bastante ineficiente quando comparado com a eficiência teórica (2,5 MJ/kg de água evaporada). Considerando 2,5 MJ/kg como 100% eficiente, o melhor tratamento (40/25/0,5), obteve 48 % de eficiência na secagem e 24,5 % para o total do sistema. Com 1,0 m de altura aumentou para 80,6 e 39,7 % para eficiência de secagem e do sistema respectivamente. Comparando os dados obtidos no experimento com resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores, os melhores resultados estão dentro da faixa de 3,0 a 10,0 MJ/kg de água evaporada, citada por BAKKER-ARKEMA *et al* (1978), NELLIST (1987), BROOKER *et al.* (1992). YOUNG (1984), obteve um requerimento médio de 8,01 MJ/kg, trabalhando com amendoim, em secador com camada fixa de secagem.

#### 5.3.1.2.8. Custos da secagem

Nestes custos foram considerados os custos relativos ao total de energia requerida para evaporar 1,0 kg de água do produto, desmembrando-se este total nos dois fatores que o compõe, que são as resistências e o ventilador. O valor do kWh de R\$ 0,059 foi obtido do BOLETIM INFORMAÇÃO (08/94). Considerando o valor da tarifa cobrada aos produtores rurais. Os preços do kW (energia elétrica) e kg (lenha e bagaço de cana) estão indicados com mais de duas casas após a vírgula para não superestimar o custo da secagem.

Tabela 6 - Custos da secagem do amendoim, por kg de água retirada, nos diversos tratamentos, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m, utilizando a energia elétrica como combustível.

Tratamentos	Energia requerida ( MJ/kg )			Valor/MJ ( R\$ )	Custos por kg de água (R\$ )		
	Resistências	ventilador	Total		Resistências	Ventilador	Total
60/12,5/0,5	12,5	3,7	16,2	0,0165	0,21	0,06	0,27
60/18,0/0,5	11,2	3,4	14,6	0,0165	0,18	0,06	0,24
60/25,0/0,5	8,1	3,1	11,2	0,0165	0,13	0,05	0,18
45/12,5/0,5	10,2	5,9	16,1	0,0165	0,17	0,10	0,27
45/18,0/0,5	7,3	5,7	13,0	0,0165	0,12	0,09	0,21
45/25,0/0,5	9,7	4,9	14,6	0,0165	0,16	0,08	0,24
40/12,5/0,5	9,9	9,2	18,2	0,0165	0,16	0,15	0,31
40/18,0/0,5	10,1	9,7	19,8	0,0165	0,16	0,16	0,32
40/25,0/0,5	5,2	4,8	10,0	0,0165	0,09	0,08	0,17
40/25,0/1,0	3,7	3,7	7,4	0,0165	0,06	0,06	0,12

Ao analisar a Tabela 6, observa-se que existem diferenças significativas de custos por kg de água retirada. Comparando-se os dois tratamentos mais eficientes, o de 40/25/0,5 têm um custo de 42 % a mais que o tratamento com 40/25/1,0, isto é, para cada real gasto para retirar um kg de água com este último tratamento, gastar-se-ia R\$ 1,42 com o tratamento de 40/25/0,5. Na comparação do mais eficiente 40/25/1,00, com o menos eficiente, têm-se para cada um real deste, R\$ 2,70 para o tratamento menos eficiente (40/18/0,5). Por exemplo, para retirar 1000 kg de água utilizando o tratamento menos eficiente (40/18/0,5), gastar-se-ia R\$ 320,00, enquanto que para o tratamento mais eficiente (40/25/1,0), gastar-se-ia R\$ 120,00.

---

Estes dados realçam o quanto é possível reduzir ou aumentar os custos finais dos produtos, no pré-processamento destes, em função das condições de secagem em que o produto será submetido, considerando também os teores iniciais e finais de umidade do produto.

#### 5.3.1.2.8.1. Combustíveis alternativos - biomassa, uma analogia com a energia elétrica.

Dentro das condições experimentais, a análise de comparação dos combustíveis e seus custos, considerou os valores relativos à energia requerida para o aquecimento do ar de secagem, pois os custos com a movimentação do ar aquecido permanecerá o mesmo para qualquer combustível a ser utilizado.

Os valores por kg de lenha (eucalipto), bagaço de cana e kWh de energia elétrica, foram obtidos do BOLETIM INFORMAÇÃO (08/94). Nos valores de energia elétrica, considerou-se a tarifa cobrada aos produtores rurais. Para a lenha, foi considerado como unidade comercial o metro cúbico estéreo ( $m^3_{st}$ ), igual a 450 kg de lenha seca, e o valor médio de R\$ 10,37 por metro cúbico estéreo, obtido de 9 regiões do estado de São Paulo. A unidade comercial do bagaço de cana foi a tonelada (t), com um valor de R\$ 8,49 por tonelada.

Para a obtenção da quantidade de lenha e bagaço de cana necessária para evaporar 1,0 kg de água do produto, comparado com a energia elétrica consumida nos experimentos, utilizou-se o valor do PCI (Poder Calorífico Inferior) de 11,28 MJ/kg para o eucalipto seco ao ar e 6,69 MJ/kg para o bagaço de cana ANDRADE *et al.* (1984), considerando a eficiência média da fomalha de 60 %, SILVA *et al.* (1991).

Considerando a existência destes combustíveis no mercado e que a secagem do amendoim pudesse ser realizada com as três alternativas de energéticos conforme Tabela 7, a secagem através da utilização do bagaço de cana seria a opção mais econômica e a energia elétrica a condição menos favorável a ser utilizada.

Tabela 7 - Custos comparativos da energia requerida para aquecimento do ar através de energia elétrica, lenha e bagaço de cana, com o amendoim para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m.

Tratament.	Ener. da resist. MJ/kg de água	kg lenha por kg de água	kg bag. de cana por kg de água	Valor do kg de lenha ( RS )	Valor do kg de bag. cana ( RS )	Custos comparativos para retirar 1000 kg de água do amendoim, em (RS).		
						lenha	bagaço	eletric.
60/12,5/0,5	12,5	1,85	3,11	0,023	0,0085	42,55	26,44	210,00
60/18,0/0,5	11,2	1,65	2,79	0,023	0,0085	37,95	23,72	180,00
60/25,0/0,5	8,1	1,20	2,02	0,023	0,0085	27,60	17,17	130,00
45/12,5/0,5	10,2	1,51	2,54	0,023	0,0085	34,73	21,59	170,00
45/18,0/0,5	7,3	1,08	1,82	0,023	0,0085	24,84	15,47	120,00
45/25,0/0,5	9,7	1,43	2,42	0,023	0,0085	32,89	20,57	160,00
40/12,5/0,5	9,4	1,46	2,47	0,023	0,0085	33,58	20,99	160,00
40/18,0/0,5	10,1	1,49	2,52	0,023	0,0085	34,27	21,42	160,00
40/25,0/0,5	5,2	0,77	1,30	0,023	0,0085	17,71	11,05	90,00
40/25,0/1,0	3,7	0,55	0,92	0,023	0,0085	12,65	7,82	60,00

A proporção média dos custos para o aquecimento do ar, entre o bagaço de cana e a energia elétrica foi de 1:7,7, isto é, para cada R\$ 1,00 gasto na secagem com o bagaço de cana, gastaria-se R\$ 7,70 com a energia elétrica. A proporção média entre o bagaço de cana e a lenha foi de 1:1,6 e da lenha com a energia elétrica foi de 1:4,8.

Ao retirar 1000 kg de água do amendoim, considerando o melhor e o pior tratamento em relação a eficiência energética, 40/25/1,0 e 60/12,5/0,5 (Tabela 7), obtêm-se valores extremamente diferenciados, passando de R\$ 7,82, 12,65 e 60,00 para bagaço de cana, lenha de eucalipto e energia elétrica respectivamente, no tratamento 40/25/1,0, para R\$ 26,44, 42,55 e 210,00 no tratamento 60/12,5/0,5. Estes dados mostram, que a utilização



da energia elétrica nos processos de secagem, para o aquecimento do ar, torna-se totalmente inviável.

Comparando valores dentro de um mesmo tratamento (Tabela 7), em relação a energia elétrica para retirar 1000 kg de água, observa-se uma diferença de R\$ 52,18 e 47,35 favoráveis ao bagaço de cana e lenha de eucalipto para o tratamento mais eficiente energeticamente (40/25/1,0) e, uma diferença de R\$ 183,56 e 167,45 favoráveis ao bagaço de cana e lenha de eucalipto, para o tratamento menos eficiente (60/12,5/0,5). Em relação aos dois tratamentos têm-se uma diferença de R\$ 18,62 quando se utiliza o bagaço de cana, R\$ 29,9 com a lenha e R\$ 150,00 quando se utiliza a energia elétrica.

A Tabela 7 mostra que independentemente do combustível a ser utilizado é possível obter uma grande redução de custos ao se trabalhar com equipamentos adequados e ajustados às diferentes condições do produto (espécie, teor de umidade inicial, altura de camada) e dos parâmetros de secagem (temperatura e fluxo de ar de secagem e condições ambientes).

Uma das dificuldades na utilização de alguns combustíveis energéticos como o bagaço de cana, talvez seja o grande volume que necessita ser manejado e a existência de fornalhas adaptadas para estes tipos de combustíveis, para que se tenha uma combustão completa. Considerando os tratamentos citados anteriormente, utilizaria-se 3110 kg de bagaço de cana e 1850 kg (4,1 m<sup>3</sup>st) de lenha de eucalipto para retirar 1000 kg de água do amendoim com o tratamento 60/18/0,5 e para o tratamento 40/25,0/1,0, seriam necessários 770 kg de bagaço de cana e 550 kg (1,2 m<sup>3</sup>st) de lenha, portanto uma redução entre tratamentos de 2340 kg para o bagaço de cana, para 1300 kg (2,9 m<sup>3</sup>st) com a lenha de eucalipto.

#### 5.3.1.2.8.2. Custos operacionais da secagem do amendoim, considerando o produto seco.

A análise final dos custos operacionais de secagem, relativos ao amendoim, considerando o valor por 1000 kg de produto seco, Tabela 8, considera as condições iniciais e finais dos teores de umidade do amendoim para cada tratamento, não sendo possível se fazer uma análise comparativa entre os tratamentos. Esta análise, além de indicar os custos operacionais, pode servir de instrumento para planejar e adequar a estrutura de secagem e armazenagem, bem como o escalonamento do plantio e colheita do produto.

Tabela 8 - Custos operacionais totais de secagem (ventilador + aquecimento do ar) do amendoim, considerando o produto seco, após a retirada de 1000 kg de água.

Tratamentos	U. I. (%)	U. F. (%)	Quantidade de produto úmido (kg)	Quantidade de produto seco(kg)	Custos de 1000 kg de produto seco (R\$)		
					energ. elétr.	lenha	bag cana
60/12,5/0,5	13,8	8,9	18.592	17.592	15,34	5,65	4,89
60/18,0/0,5	15,0	10,4	19.478	18.478	12,98	5,30	4,54
60/25,0/0,5	15,0	9,8	17.346	16.346	11,01	4,77	4,10
45/12,5/0,5	12,2	9,3	31.276	30.276	8,91	4,46	4,03
45/18,0/0,5	12,5	9,4	29.226	28.226	7,44	4,07	3,72
45/25,0/0,5	13,5	9,9	25.028	24.028	9,98	5,03	4,54
40/12,5/0,5	13,0	9,9	29.066	28.066	11,04	6,56	6,09
40/18,0/0,5	12,0	9,8	41.000	40.000	7,80	4,85	4,52
40/25,0/0,5	17,4	10,1	12.315	11.315	15,02	8,66	8,04
40/25,0/1,0	18,3	10,1	10.963	9.963	12,04	7,33	6,83

As quantidades de produto úmido são diferentes, em função de que os teores de umidade iniciais e finais foram diferentes nos testes desenvolvidos durante a fase experimental. Os valores da quantidade de produto úmido foram obtidos através da eq. (1).

$$Pi = (Ar) * \left( \frac{100 - Uf}{Ui - Uf} \right) \quad (1)$$

onde:

$Pi$  = Peso inicial do produto úmido, (kg)

$Ar$  = Água retirada, (kg)

$Ui$  = Umidade inicial do produto b.u. (%)

$Uf$  = Umidade final do produto b.u. (%)

A retirada do produto da lavoura com alto teor de umidade, faz com que se tenha uma série de vantagens, dentre as quais, destaca-se a preservação da qualidade do produto. Por outro lado, haverá um acréscimo nos custos finais de produção, como foi possível observar nos testes realizados, conforme Tabela 8, onde os tratamentos com menor quantidade de umidade retirada em pontos percentuais, foram os que tiveram os menores custos operacionais..

A utilização da energia elétrica como fonte de aquecimento do ar de secagem, pode inviabilizar o processo de secagem. Considerando-se por exemplo o tratamento 60/12,5/0,5, com R\$ 15,34 para cada 1000 kg de produto seco, obteria-se um valor de R\$ 0,38 para cada saca de 25 kg de produto seco, o que corresponderia a 5,34 % do valor obtido pelos produtores a nível de lavoura, que é de R\$ 7,00 (Estado de São Paulo). Utilizando a lenha como fonte de combustível, este valor seria de R\$ 0,14, representando 2 % do valor comercial do amendoim.

Para uma mesma temperatura, houve uma tendência de redução dos custos do produto seco, quando se aumentou o fluxo de ar de secagem. O bagaço de cana seria a alternativa energética mais econômica a ser utilizada no processo de secagem do amendoim.

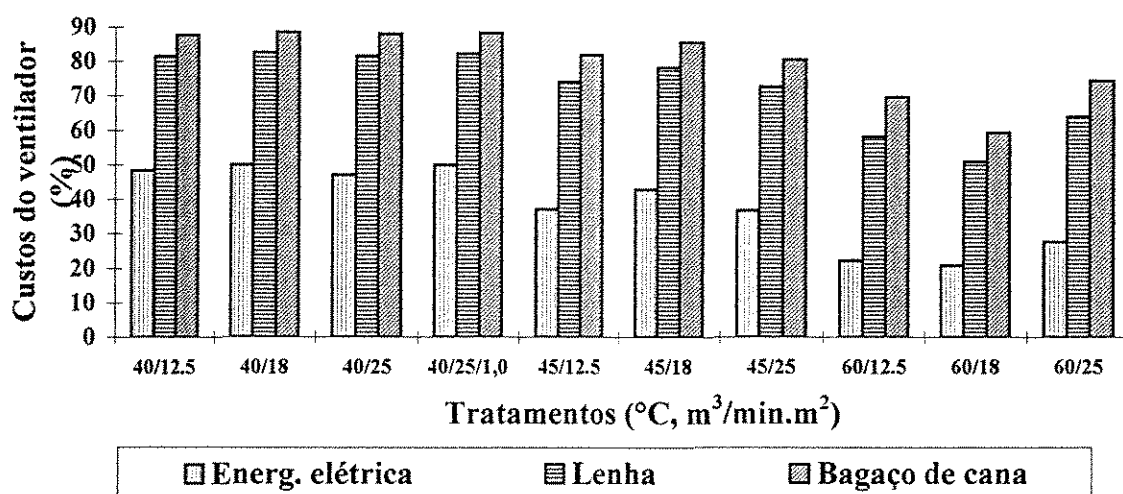


Figura 14 - Participação do ventilador em (%), nos custos totais, em 1000 kg de amendoim seco, para a energia elétrica, lenha e bagaço de cana, e alturas da camada de 0,5 e 1,0 m

A Fig. 14, mostra a proporção, em que o conjunto motor-ventilador, participa na composição dos custos totais do processo de secagem do amendoim, considerando o produto seco, Tabela 8. A utilização de baixas temperaturas e fluxos de ar de secagem, tornam o ventilador como o principal fator na composição dos custos do processo de

secagem. No tratamento 40/12,5/0,5, a proporção de custos relativa ao conjunto motor-ventilador, foi de 48,0, 81,5 e 87,8 % , para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana respectivamente. A medida em que diminui o valor do combustível utilizado para o aquecimento do ar, aumentou a proporção do ventilador na participação dos custos totais do processo de secagem.

Houve uma tendência de redução desta proporção, a medida em que se aumentou a temperatura do ar de secagem, em função de que, o requerimento de energia para aquecimento do ar para temperatura de 60 ° C, foi muito maior que na temperatura de 40 ° C, reduzindo assim a proporção entre os custos relativos ao aquecimento e da movimentação do ar de secagem.

#### 5.3.1.3. Qualidade do produto

A qualidade do amendoim foi avaliada apenas em função dos aspectos externos possíveis de serem detectados sem o auxílio de equipamentos. Os fatores avaliados foram; vagens abertas e danificadas, grãos partidos e grãos com película solta.

##### 5.3.1.3.1. Análise inicial, no recebimento

O percentual referentes aos parâmetros, grãos partidos e película solta, está relacionado com total de grãos existentes em 100 vagens; Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios qualitativos de 100 vagens para diversos fatores externos do amendoim, no recebimento do produto.

Produto	Grãos número	Grãos partidos (%)	Película solta (%)	Vagens abertas (%)	Vagens danific. (%)
Amendoim.	282	0	0	3	13

Após a pré-limpeza constatou-se um percentual de 13 % de vagens danificadas no processo de colheita mecânica, Tabela 9. As vagens danificadas permitem a infestação e contaminação por insetos e microorganismos, facilitando a deterioração e dificultando o processo de armazenamento do produto, principalmente quando a secagem não se processar logo após a colheita. Os aspectos como ponto de colheita, adequação dos equipamentos de colheita, secagem e armazenagem do produto, devem ser considerados e ajustados de forma a reduzir perdas de qualidade e quantidade do produto.

#### 5.3.1.3.2. Qualidade do amendoim após a secagem

A média de grãos existentes nas amostras das 100 vagens para cada tratamento foi de 281,2 ou seja, 2,8 grãos por vagem.

Todos os parâmetros analisados e avaliados mostram tendência de redução na qualidade do produto, a medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem. Isto se torna muito mais evidente e significativo quando se utilizou temperatura de 60 ° C, conforme Tabela 10. Obtendo-se valores, de 0,0 % a 10,15 % de grãos partidos, de 0,0 % a 15,5 % de grãos com película solta e de 9,0 % a 18,0 % quando se variou a temperatura de 40 ° C para 60 ° C.

Tabela 10 - Valores médios qualitativos de diversos fatores externos do amendoim, após a secagem, para alturas da camada de 0,5 e 1,0 m.

Tratamentos	Grãos (número)	Grãos partidos (%)	Película solta (%)	Vagens abert. (%)
60/12,5/0,5	274	3,50	10,85	15,0
60/18,0/0,5	286	7,93	15,02	17,0
60/25,0/0,5	294	10,15	15,85	18,0
45/12,5/0,5	274	1,10	1,10	10,0
45/18,0/0,5	282	2,00	0,95	10,0
45/25,0/0,5	275	1,82	2,52	13,0
40/12,5/0,5	287	0,00	0,00	9,0
40/18,0/0,5	275	1,00	0,70	11,0
40/25,0/0,5	277	0,00	1,30	11,0
40/25,0/1,0	288	0,00	0,00	9,0

Para uma mesma temperatura de secagem, nos parâmetros avaliados, a qualidade do amendoim é reduzida quando se aumenta o fluxo de ar de secagem. O aumento do fluxo, bem como da temperatura do ar de secagem está relacionado com uma maior velocidade de secagem do produto, Fig. 10, ocasionando a retirada muito rápida da umidade dos produtos, prejudicando desta forma a qualidade final do amendoim, o que está de acordo com TROEGER & BUTLER (1980) e WOODROF (1983).

Na análise da variável qualitativa, "grãos partidos", a interação entre o fator temperatura e o fator fluxo do ar foi significativa, quanto maior o fluxo e temperatura do ar de secagem maior foi o número de grãos partidos. O teste Tukey mostrou que com temperatura de 60 ° C e fluxo de ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> ocorreu a maior média de grãos partidos. As temperaturas de 45 e 40 ° C foram estatisticamente iguais.

A análise de variância para a variável "película solta", indicou que, somente o fator temperatura foi significativo. O teste Tukey mostra que a temperatura de 60 ° C foi a que mais contribuiu para o número de grãos com película solta, sendo que as temperaturas de 45 e 40 ° C foram estatisticamente iguais.

Na variável "vagens abertas", tanto a temperatura como o fluxo de ar foram significativos, influenciando no percentual de vagens abertas. A temperatura de 60 ° C e fluxos de 25 e 18 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> foram os que tiveram maior influência, sendo que as temperaturas de 45 e 40 ° C foram estatisticamente iguais. Os dados referentes a vagens abertas foram ajustados a uma equação não linear, eq. (2), com R<sup>2</sup> de 95,04 %.

$$Y = 12,66 + 0,33T + 0,21F \quad (2)$$

onde:

$Y$  = número médio de vagens abertas (%)

$T$  = temperatura de secagem (° C)

$F$  = fluxo de ar de secagem (m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>)

Os melhores resultados foram obtidos com temperatura de 40 ° C, não havendo variação significativa na qualidade do amendoim, com os diferentes fluxos de ar de secagem utilizados, mesmo quando a altura de camada passou de 0,5 para 1,0 m de altura,

sendo que o maior fluxo de ar ( $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ ), proporcionou uma maior uniformidade de secagem.

Pelos resultados obtidos é possível trabalhar sem prejudicar a qualidade do amendoim, com temperaturas de até  $45^\circ \text{C}$ , em todos os fluxos de ar utilizados no experimento

---

#### 5.3.1.4. Conclusões referentes ao processo de secagem do amendoim

Os gradientes de temperatura e umidade foram maiores com o aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto que, com maior fluxo de ar, obteve-se uma redução nos dois gradientes na coluna de secagem. O maior fluxo de ar ( $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ ), proporcionou uma maior uniformidade de secagem do produto.

O aumento da temperatura e fluxo de ar de secagem aumentou a taxa de secagem do amendoim.

Com baixas temperaturas de secagem, o ventilador foi um dos principais fatores de utilização de energia durante o processo de secagem.

A melhor eficiência energética foi obtida com a combinação da temperatura de  $40^\circ \text{C}$  e fluxo de ar de secagem de  $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ , com valores para a energia requerida de 3,7 e 7,4 MJ/kg de água retirada para a eficiência de secagem e eficiência do sistema de secagem respectivamente, na altura de camada de 1,0 m e, 5,2 e 10,0 MJ/kg na altura de 0,5 m de camada de produto.

A eficiência energética de secagem manteve uma tendência de redução à medida que se aumentou a temperatura do ar de secagem e melhorou quando se aumentou o fluxo de ar. A eficiência do sistema de secagem manteve uma tendência de aumentar com o aumento da temperatura e fluxo de ar de secagem.

O menor custo de secagem em relação aos combustíveis alternativos comparados foi obtido com o tratamento mais eficiente energeticamente (40/25/1,0), com valores de R\$ 60,00, 12,65 e 7,82 para retirar 1000 kg de água, com os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.



Em relação ao produto seco, o melhor resultado foi obtido com o tratamento que detinha o menor teor de umidade inicial (45/18/0,5), com valores de R\$ 7,44, 4,07 e 3,72 para cada 1000 kg de produto seco, para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.

Os fatores de qualidade de amendoim analisados como grãos partidos, película solta e vagens abertas, mantiveram uma tendência de reduzir a qualidade com o aumento de temperatura e do fluxo de ar de secagem. A temperatura de 60 ° C foi prejudicial a qualidade do amendoim.

Os resultados obtidos indicam que foi possível utilizar temperaturas de até 45 ° C, sem que houvesse prejuízo da qualidade do produto.

Os melhores resultados em relação a uniformidade de secagem, eficiência energética e qualidade do produto foram obtidos com temperatura de 40 ° C, e fluxo de ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, com altura de camada de 1,0 m.

O modelo, (  $Y = B0 + B1T + B2F$  ) foi adequado para representar o número de vagens abertas, em função da temperatura e fluxo do ar de secagem, pois a correlação com os dados experimentais foi excelente. O modelo não foi adequado para representar os demais itens pesquisados no processo de secagem do amendoim.

### 5.3.2. Milho-pipoca

Foram realizados 18 testes experimentais com o milho-pipoca, sendo nove testes com umidade inicial de 16 % e nove com 22 %. Em todos os testes foi utilizado um peso médio de 25 kg de produto. Não houve variação na altura da camada (0,5 m), em função do sistema de secagem, leito fixo, e da quantidade de produto disponível.

#### 5.3.2.1. Condições ambientes e de trabalho, na secagem do milho-pipoca

Tabela 11 - Condições ambientes, durante o desenvolvimento do experimento para diferentes teores de umidade, 16 e 22 %, e altura de camada de 0,5 m, com o milho-pipoca, no período de 01 a 19/03/1994.

Tratam.	Teor de umidade inicial = 16 %						Teor de umidade inicial = 22 %					
	Temp.do ar (° C )			Umid. relat. ( %)			Temp. do ar (° C )			Umid. relat. ( %)		
	máx	méd	mín	máx	méd	mín	máx	méd	mín	máx	méd	mín
60/12,5	28,0	23,9	22,0	78,0	75,8	68,0	30,0	26,9	24,0	82,0	70,4	55,0
60/18,0	26,0	24,6	24,0	78,0	73,5	66,0	33,0	29,9	24,0	82,0	63,8	54,0
60/25,0	28,0	26,4	25,0	62,0	59,4	58,0	33,0	30,0	27,0	84,0	74,1	60,0
45/12,5	25,0	23,2	22,0	74,0	70,8	65,0	29,0	26,3	24,0	84,0	74,2	66,0
45/18,0	27,0	25,8	24,0	70,0	64,5	58,0	29,0	27,4	24,0	82,0	66,6	58,0
45/25,0	24,0	23,0	22,0	78,0	75,5	72,0	30,0	26,5	24,0	90,0	79,6	62,0
40/12,5	27,0	26,4	26,0	68,0	66,8	66,0	28,0	26,8	25,0	84,0	78,9	74,0
40/18,0	25,0	24,0	23,0	74,0	70,5	68,0	30,0	26,2	24,0	90,0	79,1	66,0
40/25,0	28,0	26,7	26,0	78,0	73,3	74,0	29,0	26,7	24,0	78,0	73,3	64,0
<b>Média</b>	<b>26,4</b>	<b>24,9</b>	<b>23,8</b>	<b>73,3</b>	<b>70,0</b>	<b>66,1</b>	<b>30,1</b>	<b>27,4</b>	<b>24,4</b>	<b>84,0</b>	<b>73,3</b>	<b>62,1</b>
D.Pad.	1,51	1,46	1,61	5,66	5,49	5,44	1,76	1,48	1,01	3,87	5,59	6,25
C.V (%)	5,70	5,85	6,90	7,71	7,84	8,23	5,86	5,41	4,61	4,61	7,62	10,1

O coeficiente de variação, tanto para temperatura, como umidade relativa do ar, nos dois teores de umidade se situaram abaixo de 10 %, mostrando que a variabilidade de um tratamento para outro não foi significativa, o que permite que se possa ter um comparativo entre os dados obtidos.

Com o teor de umidade de 22 % a variação foi maior, principalmente em relação a umidade relativa do ar, onde o coeficiente de variação foi de 10,1 % para os valores da

umidade relativa mínima, registrada durante os testes. Isto se justifica, pois com teor de umidade maior, o período de secagem também foi maior, alcançando valores extremos bem diferenciados de tratamento para tratamento.

Tabela 12 - Resultados obtidos dos experimentos realizados com o milho-pipoca, para os teores de umidade iniciais de 16 % e 22 %, e altura da camada de 0,5 m.

Tratamentos	U.I. (%)	U.F. (%)	Período secagem (h)	Resistên. ligadas (%)	Água retirada (kg)	Eficiênc. secagem (MJ/kg)	Eficiênc. sistema (MJ/kg)	Consumo ventilador (%)
Umidade inicial do milho-pipoca = 16 %								
60/12,5/0,5	16,0	10,1	4,5	47,7	1,64	12,1	17,0	28,8
60/18,0/0,5	16,0	10,7	2,9	63,7	1,48	11,9	15,7	24,2
60/25,0/0,5	16,0	11,7	2,1	68,3	1,22	11,1	14,4	22,9
45/12,5/0,5	16,0	11,4	5,9	30,3	1,30	11,7	18,9	38,1
45/18,0/0,5	16,0	11,5	4,7	25,5	1,27	8,1	14,2	42,9
45/25,0/0,5	16,0	11,9	2,9	45,8	1,16	9,8	14,6	32,9
40/12,5/0,5	16,0	11,1	7,9	23,5	1,38	12,1	20,9	42,1
40/18,0/0,5	16,0	12,2	5,2	24,1	1,08	9,7	17,1	43,3
40/25,0/0,5	16,0	12,5	3,9	23,7	1,00	7,9	14,1	43,9
Umidade inicial do milho-pipoca = 22 %								
60/12,5/0,5	22,0	10,5	9,0	40,4	3,21	9,5	14,0	32,1
60/18,0/0,5	22,0	10,5	7,2	51,8	3,21	9,7	13,5	28,1
60/25,0/0,5	22,0	11,0	4,7	67,3	3,09	8,7	11,2	22,3
45/12,5/0,5	22,0	11,0	13,9	23,7	3,09	9,0	15,6	42,3
45/18,0/0,5	22,0	11,6	9,5	21,9	3,07	6,1	11,1	45,0
45/25,0/0,5	22,0	12,4	7,9	31,3	2,74	7,5	12,3	39,2
40/12,5/0,5	22,0	12,7	15,2	16,9	2,67	7,6	15,9	52,2
40/18,0/0,5	22,0	12,3	11,8	11,3	2,77	3,9	9,9	60,6
40/25,0/0,5	22,0	12,9	10,4	12,7	2,61	4,3	10,3	58,3

Na umidade final (U.F.) do milho-pipoca considerou-se o valor médio da coluna de secagem. Os demais itens relacionados na Tabela 12 serão analisados e discutidos nos próximos tópicos.

#### 5.3.2.2. Secagem

Nesta seção foram analisados e discutidos os resultados referentes aos itens; curvas de secagem, gradiente de umidade e temperatura, potencial de secagem, período de

secagem e funcionamento das resistências elétricas, energia utilizada pelo ventilador, eficiência do processo de secagem e custos da secagem.

#### 5.3.2.2.1. Curvas de secagem

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram o comportamento da coluna de secagem em diferentes alturas da massa de grãos. Foram selecionados os tratamentos 45/18/0,5 e 60/18/0,5, com umidade inicial de 16 % e os tratamentos 60/25/0,5 e 60/18/0,5, com umidade inicial de 22 % para representar e comparar as curvas de secagem do milho-pipoca. A escolha se deu em função de se comparar testes realizados em diferentes condições experimentais e que obtiveram o mesmo período de 4,7 horas de secagem e umidade final de 11,5 e 11,0 %, respectivamente, e também, poder comparar testes realizados com os mesmos parâmetros de secagem (temperatura e fluxo de ar ), com variação do teor de umidade inicial de 16 para 22 %. A última meia hora, nas quatro curvas de secagem, representa o período de resfriamento do milho-pipoca na coluna de secagem do secador.

Comparando-se as Fig.15, 16, 17 e 18, foi possível observar que o produto na parte superior permanece com teor de umidade elevado até o final do processo de secagem, sendo isto, mais evidenciado na Fig.15, onde se utilizou um menor fluxo e temperatura do ar de secagem.

O produto na parte inferior sofreu uma super secagem, principalmente quando foi utilizado produto com teor de umidade de 22 % e maior temperatura e fluxo do ar de secagem. No final do processo de secagem o produto é retirado do secador com diferentes teores de umidade e temperatura, implicando na necessidade de resfriar e de misturar adequadamente o produto antes de ser armazenado

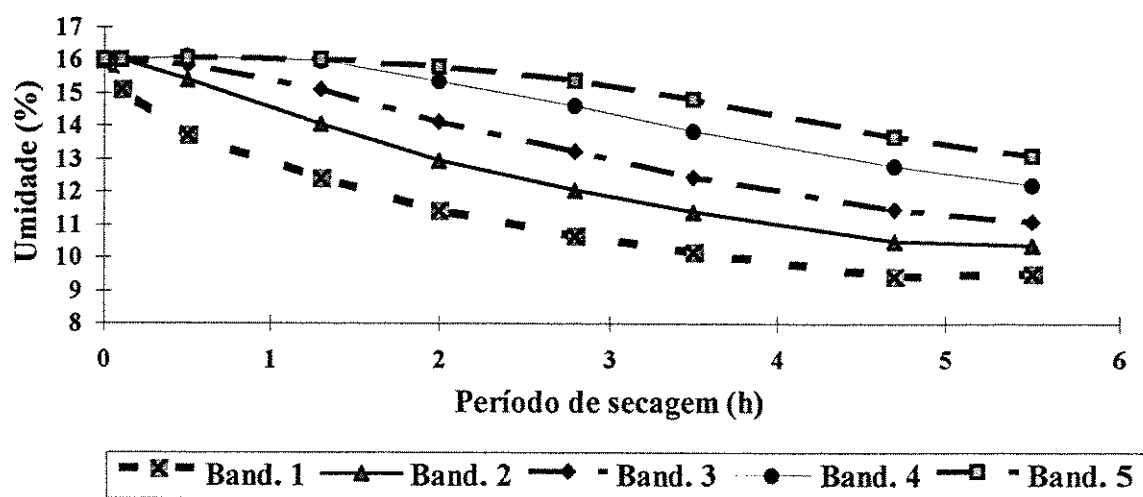


Figura 15 - Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 45/18/0,5, com umidade inicial de 16 %.

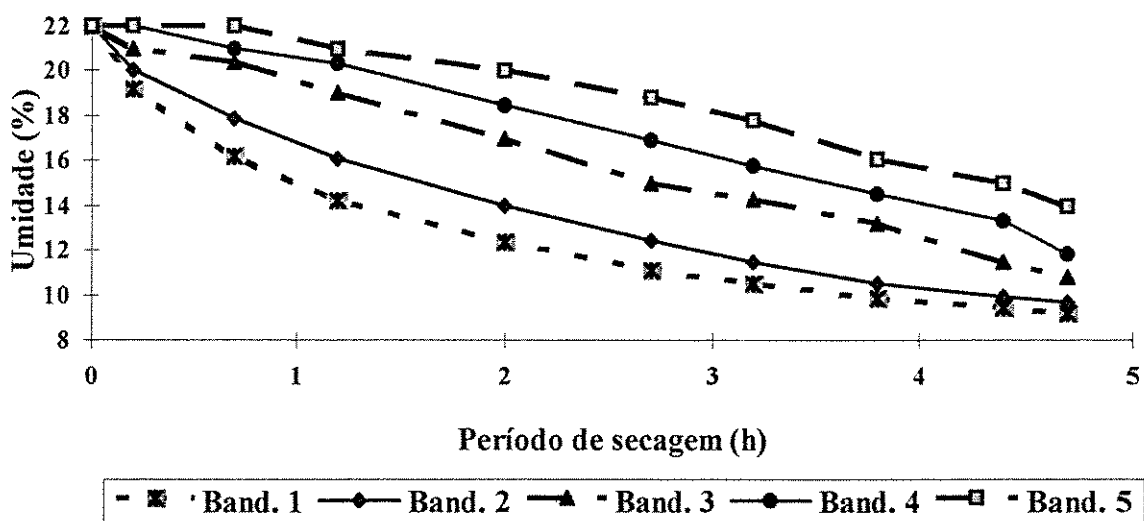


Figura 16 - Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/25/0,5, com umidade inicial de 22 %.

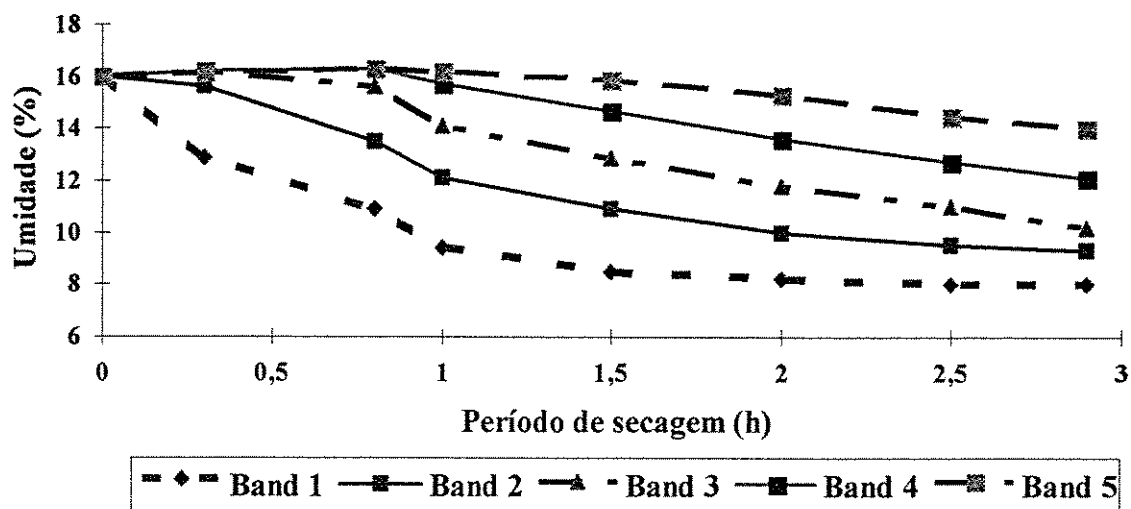


Figura 17 - Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/18/0,5, com umidade inicial de 16 %.

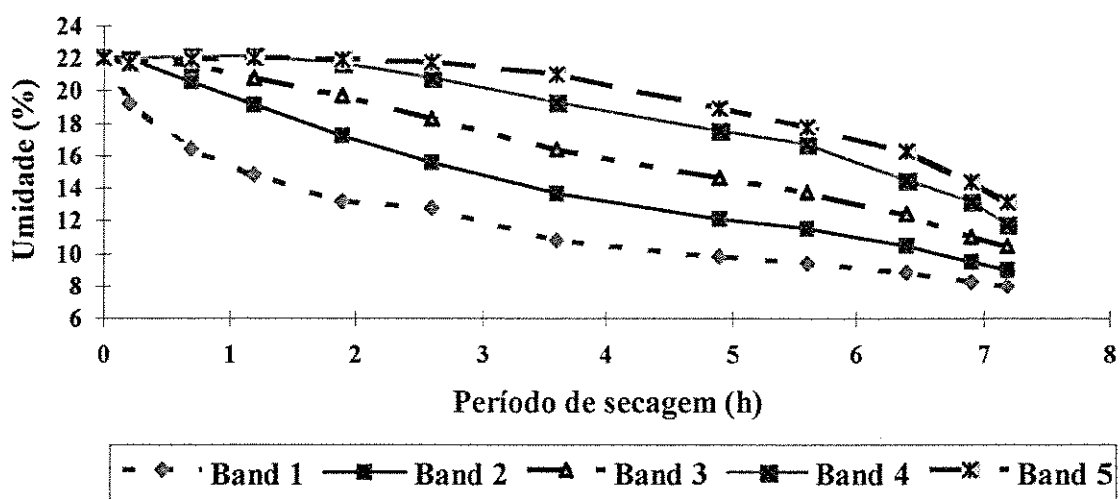


Figura 18 - Curvas de secagem do milho-pipoca, tratamento 60/18/0,5, com umidade inicial de 22 %.

No mesmo período de secagem, a quantidade de água retirada foi de 1,27 e 3,09 kg para as Fig.15 e 16, sendo obtido valores médios de 0,32 e 0,66 kg por hora de secagem, isto é, o tratamento 60/25/0,5 retirou 2,06 vezes mais água que o tratamento 45/18/0,5, fazendo com que o produto com maior teor de umidade concluí-se, a secagem no mesmo

intervalo de tempo. Isto mostra que é possível ajustar e planejar a velocidade de secagem durante o período de colheita do produto, desde que esta velocidade não interfira na qualidade final do produto.

As curvas de secagem representadas pelas Fig. 17 e 18, realçam o fator referente à condição inicial do produto. Para a comparação destes tratamentos, foram fixadas as condições de secagem (temperatura e fluxo de ar ), variando o teor de umidade inicial do produto. Na comparação destas Figuras, foi possível observar que a umidade inicial influenciou de forma significativa no período total de secagem e na condição final do produto.

---

O período de secagem passou de 2,9 horas para o experimento com teor de umidade inicial de 16 %, para 7,2 horas, quando se utilizou o produto com 22 % de umidade inicial, sendo este último 2,6 vezes mais demorado que o anterior. O maior período de secagem (7,2 horas), provocou um maior gradiente final de umidade ( 0,8 pontos percentuais a mais) e aumentou a temperatura média da massa de grãos em 3,8 ° C, diminuindo o gradiente de temperatura em 7 ° C.

O comportamento destas curvas (Fig. 17 e 18), realçam a necessidade de se planejar corretamente a capacidade de processamento e funcionamento dos equipamentos em função das condições do produto, da produção e do período em que se realizará a colheita dos produtos.

#### 5.3.2.2.1.1. Resfriamento do produto

O resfriamento é uma etapa imprescindível para que se possa armazenar o produto adequadamente. Nesta etapa ainda se retira parte da umidade do produto, utilizando apenas a energia do motor mais ventilador e aproveitando o calor latente da massa de grãos. Esta combinação pode reduzir os custos e melhorar a eficiência de secagem. Outro aspecto importante do resfriamento foi o de reduzir ao máximo o gradiente de temperatura na

coluna de secagem. Esta operação deve ser efetuada, principalmente onde as unidades armazenadoras não estão dotadas com sistemas de aeração. A condição de produto seco e frio, é a situação ideal que se busca para qualquer produto que se queira armazenar com qualidade. Nas Fig.15 e 16 foram retirados 0,40 e 0,46 pontos percentuais de umidade durante o período de resfriamento do produto.

#### 5.3.2.2.2. Gradientes de temperatura e umidade

No gradiente de umidade foi considerada a diferença percentual do teor de umidade final entre as bandejas superior e inferior, no final do período de secagem, considerando o período de resfriamento. Para o gradiente de temperatura na coluna de secagem, foi considerada a máxima diferença entre a maior temperatura (plenum) e a menor temperatura (última bandeja) antes do período de resfriamento.

##### 5.3.2.2.2.1. Gradiente de umidade

Da mesma forma que ocorreu com o amendoim, foi possível verificar na Fig. 19, que houve um aumento no gradiente de umidade na fase inicial da secagem e que, com o passar do tempo, durante o processo de secagem, ocorre uma redução deste gradiente, proporcionada pelo equilíbrio higroscópico do produto em contato com uma umidade relativa e temperatura do ar de secagem, conforme foi possível observar no perfil das curvas médias de secagem, Fig. 19, onde na fase inicial, a velocidade de secagem foi maior e correspondeu também ao maior gradiente de umidade.



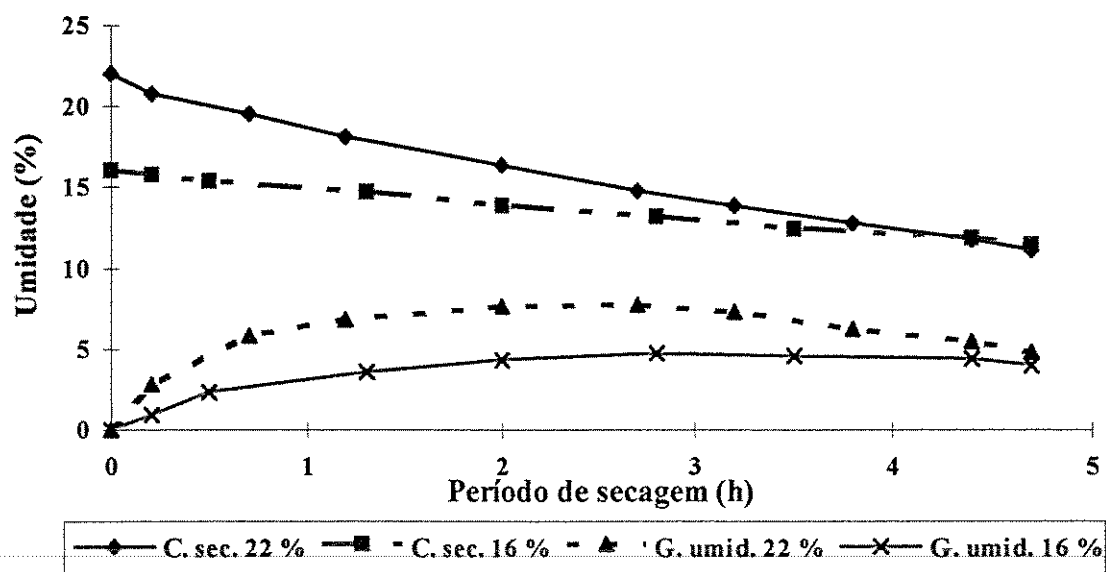


Figura 19 - Relação entre as curvas médias de secagem e o gradiente de umidade para os tratamentos 60/25/0,5 e 45/18/0,5 e umidade inicial de 22 e 16 %, para o milho-pipoca.

A Fig.19 mostra também que os valores do gradiente de umidade final ficaram muito próximos 4,0 e 4,8 % para os tratamentos 45/18/0,5 e 60/25/0,5. O maior fluxo de ar,  $25 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ , utilizado com o último tratamento fez com que ao final da secagem, o produto tivesse uma secagem mais uniforme, o que aproximou o gradiente de umidade com o tratamento 45/18/0,5.

A Fig. 20, indica que o comportamento do gradiente de umidade para os teores de 16 e 22 % possuem tendências semelhantes, sendo que, com o teor de 22 %, o gradiente de umidade foi maior que a 16 %. Isto se deve ao maior tempo de exposição do produto ao ar de secagem, ocasionando uma super secagem na camada inferior, na entrada do ar aquecido.

Para um mesmo fluxo de ar, conforme Fig. 20, o gradiente de umidade aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem. E, para uma mesma temperatura, o gradiente de umidade diminuiu quando se aumentou o fluxo de ar, concordando com BROOKER et al. (1992) e DALPASQUALE (1984). Com um maior fluxo de ar, aumenta-

se a capacidade de secagem, fazendo com que ocorra uma secagem mais uniforme. Esta mesma tendência foi obtida através dos testes experimentais com o amendoim.

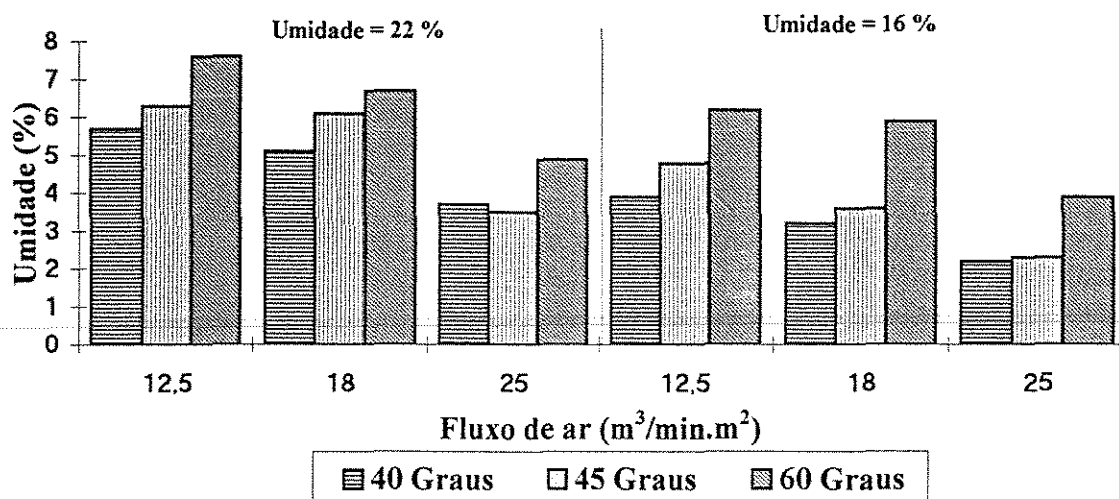


Figura 20 - Gradiente final de umidade na coluna de secagem para teores de umidade iniciais de 22 e 16 %, e 0,5 m de altura da camada, para o milho-pipoca,.

Os fatores, temperatura, fluxo de secagem e teor de umidade inicial do produto, influenciaram significativamente no gradiente final de umidade do milho-pipoca na coluna de secagem. O maior gradiente foi obtido com temperatura de 60° C, fluxo de 12,5 m³/min.m² e teor de umidade inicial de 22 %, com um valor de 7,6 pontos percentuais. Nas temperaturas de 40 e 45 ° C, as médias para gradiente de umidade foram estatisticamente iguais, sendo que o menor gradiente de umidade, 2,2 pontos percentuais, foi obtido com o tratamento 40/12,5/0,5 e teor de umidade inicial de 16 %.

Os dados obtidos experimentalmente, foram ajustados a uma equação não linear, eq. (3), com um R² de 94,9 %.

$$Y = 4,76 + 0,09T + (-0,19 F) + 0,25 U \quad (3)$$

Onde:

$Y$  = gradiente de umidade no final da secagem, (% b. u.)

$T$  = temperatura de secagem, ( $^{\circ}$  C)

$F$  = fluxo de ar, ( $\text{m}^3/\text{min}.\text{m}^2$ )

$U$  = teor de umidade inicial, (% b.u.)

#### 5.3.2.2.2. Gradiente de temperatura

O gradiente de temperatura, mostra como uma massa de grãos se comporta durante o processo de secagem, quando se trabalha com sistema de camada fixa.

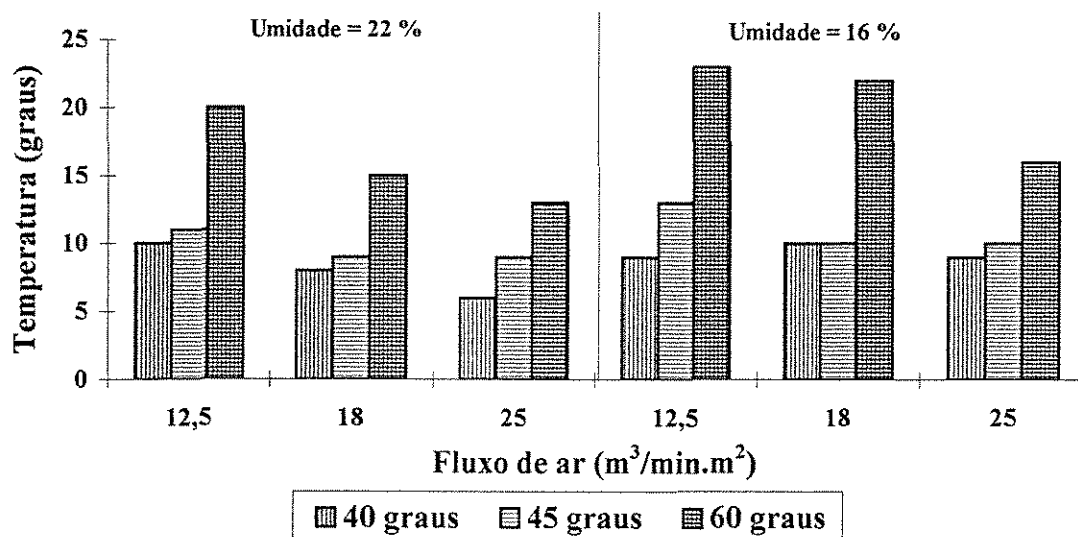


Figura 21 - Gradiente final de temperatura na coluna de secagem do milho-pipoca, para teores de umidade iniciais de 22 e 16 %, com 0,5 m de altura de camada.

O gradiente de temperatura foi menor, quando se utilizou produto com teor de umidade com 22 %. O produto com maior teor de umidade, têm por consequência, um maior período de secagem, levando toda a massa de grãos a alcançar uma temperatura mais elevada, mais próxima da temperatura de entrada do ar de secagem, reduzindo com isto o gradiente de temperatura.

O comportamento em relação a fluxo e temperatura do ar, conforme Fig. 21, foi idêntico para ambos os teores de umidade, 16 e 22 %. Para um mesmo fluxo, o gradiente de temperatura aumentou com o aumento da temperatura de secagem. E, para uma mesma temperatura, o gradiente diminuiu com o aumento do fluxo de ar.

A análise da variância mostrou que foi significativa a influência dos fatores, temperatura, fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial do milho-pipoca, no gradiente de temperatura na coluna de secagem. O maior gradiente foi obtido com temperatura de 60 ° C, fluxo de 12,5 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> e teor de umidade de 16 %, com um valor de 23 ° C. Para as temperaturas de 40 e 45 ° C, fluxos de 18 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, as médias para o gradiente de temperatura foram estatisticamente iguais, sendo que o menor valor de gradiente de temperatura, 6 ° C, foi obtido com o tratamento 40/25/0,5 e umidade inicial de 22 %.

Os dados de gradiente de temperatura na coluna de secagem, obtidos experimentalmente, foram ajustados a uma equação não linear, eq. (4), com R<sup>2</sup> de 90,6 %.

$$Y = 12,39 + 0,49T + (-0,31F) + (-0,39)U \quad (4)$$

onde:

$Y$  = gradiente de temperatura no final da secagem, (° C)

$T$  = temperatura de secagem, (° C)

$F$  = fluxo de ar, (m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>)

$U$  = teor de umidade inicial, (% b.u.)

#### 5.3.2.2.3. Potencial de secagem

A umidade relativa do ar de exaustão foi obtida a partir dos dados de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, registrados na saída do ar do secador.

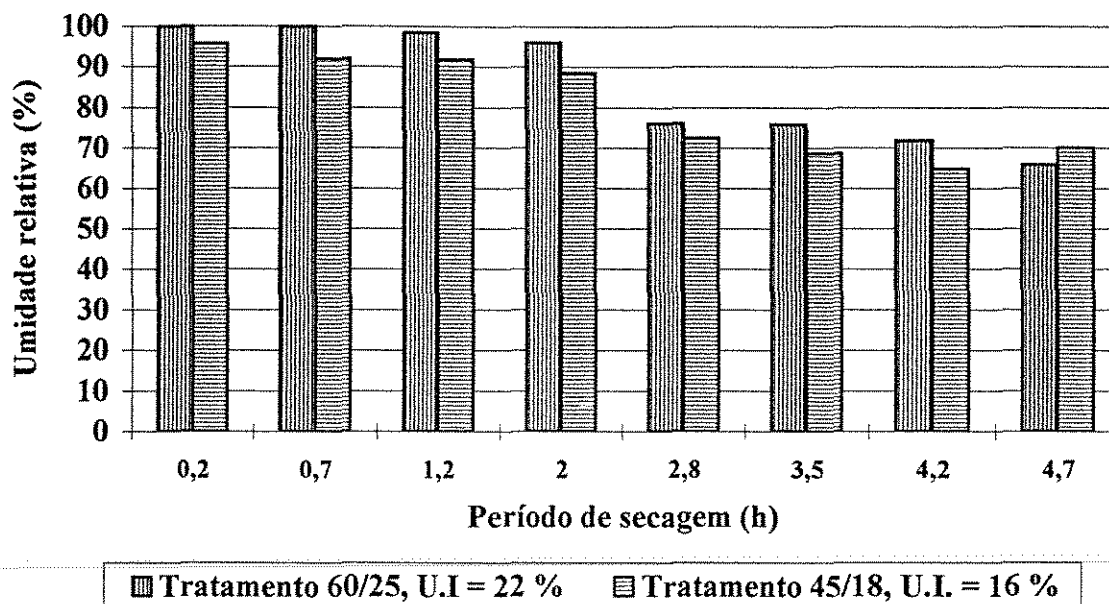


Figura 22 - Condições do ar de secagem na saída do secador, para os tratamentos 60/25/0,5 e umidade inicial de 22 % e 45/18/0,5 com 16 % de umidade inicial, para o milho-pipoca.

A Fig. 22 complementa as Fig. 15 e 16, mostrando as condições do ar de exaustão do secador após ter passado pela massa de grãos. A utilização de fluxos e temperaturas do ar de secagem em níveis diferentes, fez com que a umidade relativa do ar na saída do secador fosse muito semelhante. Com o aumento da temperatura e fluxo de ar, aumenta-se o potencial do ar secagem, o que concorda com BROOKER *et al.* (1992) e BAKER *et al.* (1993). Este aspecto é uma das explicações para o fato de que, o tratamento 60/25/0,5 e 22 % de umidade inicial concluir o processo de secagem no mesmo período que o teste 45/18/0,5 com 16 % de umidade inicial.

A Fig. 22 mostra que é possível adequar os parâmetros de secagem em função do tipo e condições do produto para que se tenha um melhor aproveitamento da energia fornecida ao ar de secagem.

Durante o processo de secagem, a média da umidade relativa do ar de exaustão foi de 85,6 % para o tratamento 60/25/0,5 e 80,6 % para o tratamento 45/18/0,5, salientando

que foi utilizado a secagem em camada estática sem movimentação do produto, com altura de camada de grãos de 0,5 m.

A maior umidade inicial do produto influenciou a umidade relativa na saída do secador, pois mesmo com temperatura de 60 ° C e fluxo do ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, o ar se manteve mais úmido, refletindo no maior aproveitamento da energia fornecida ao ar de secagem.

#### 5.3.2.2.4. Taxa de secagem

A taxa média de secagem foi obtida do total de água retirada em cada teste pelo seu período de horas utilizadas para completar o processo de secagem.

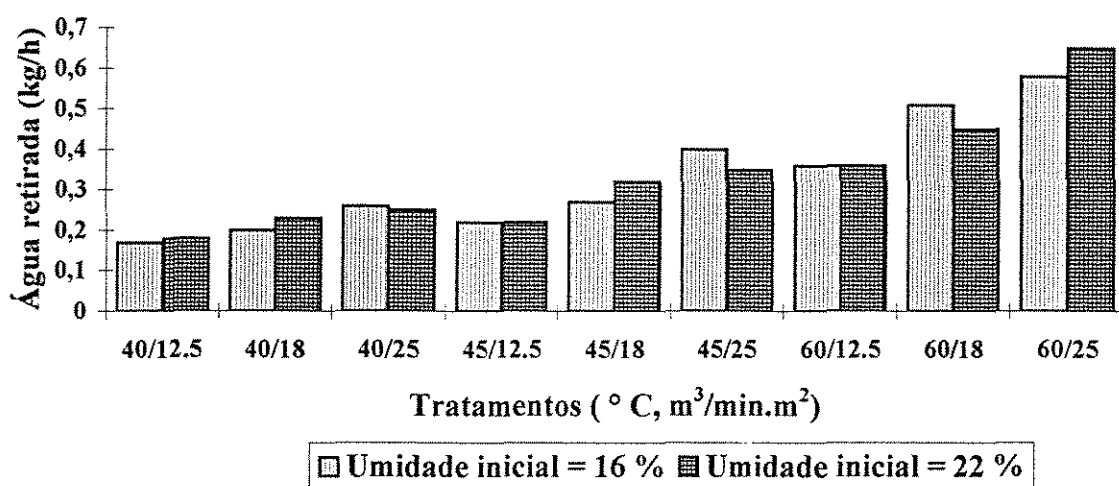


Figura 23 - Taxa média de secagem do milho-pipoca, kg/h de água retirada no processo de secagem, com teores de umidade iniciais de 16 e 22 % e 0,5 m de altura da camada.

A taxa de secagem, conforme Fig. 23, foi aumentando a medida que aumentou a temperatura e fluxo do ar de secagem, o que está de acordo com BROOKER *et al.* (1992) e BAKER *et al.* (1993).

A maior taxa de secagem, foi obtida quando se utilizou a maior temperatura e fluxo de ar de secagem, 0,58 e 0,65 kg de água /hora. A menor foi obtida com a menor temperatura e fluxo de ar, sendo 0,17 e 0,18 kg de água/hora para a umidade de 16 e 22 % respectivamente.

A análise da variância indicou que a temperatura e fluxo do ar de secagem influenciaram significativamente na taxa média de secagem do milho-pipoca. O fator umidade não foi estatisticamente significativo, Fig 23. Indicando, que a quantidade de água retirada por hora de secagem foi muito semelhante para produtos com umidades iniciais diferentes. Isto se explica em função do período de secagem, onde o maior teor de umidade inicial implicou em um maior número de horas para completar a secagem. No tratamento 40/12,5/0,5 com 22 % de umidade inicial foram necessárias 15,2 horas para completar o processo de secagem.

Os dados médios da taxa de secagem, para todos os tratamentos obtidos experimentalmente, foram ajustados a uma equação não linear, eq. (5), com um  $R^2$  de 92,8 %.

$$Y = 0,33 + 0,013T + 0,013F \quad (5)$$

onde:

$Y$  = taxa de secagem (kg/h)

$T$  = temperatura de secagem, ( $^{\circ}$  C)

$F$  = fluxo de ar, ( $m^3/min.m^2$ )

#### 5.3.2.2.5. Período de secagem e funcionamento das resistências

O período de secagem foi maior quando se utilizou o milho-pipoca com maior teor de umidade inicial e menor temperatura e fluxo do ar de secagem. Para um mesma temperatura de secagem, o período foi menor quando se aumentou o fluxo de ar, e da

mesma forma, para um mesmo fluxo de ar, o período de secagem foi menor quando se aumentou a temperatura de secagem.

No milho-pipoca, a diferença de 6 pontos percentuais, de 22 para 16 % de umidade inicial, demandou mais que o dobro de tempo para se realizar a secagem dentro das mesmas condições experimentais. Para cada uma hora de secagem do milho-pipoca com 16 % de umidade inicial foram necessários em valores médios 2,24 horas com 22 % de umidade inicial.

A análise da variância indicou que a temperatura, fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial foram estatisticamente significativos, influenciando no período total de secagem. O maior período de secagem, 15,2 horas, foi obtido com a menor temperatura e fluxo de ar e com o maior teor de umidade inicial. As médias para as temperaturas 45 e 60 ° e fluxos de 18 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, foram estatisticamente iguais. Na Fig. 24 foi possível observar como um maior fluxo de ar influência na velocidade de secagem. Os tratamentos 40/25/0,5 e 45/25/0,5, tiveram um menor período de secagem que os tratamentos 45/12,5/0,5 e 60/12,5/0,5 respectivamente, nas duas condições de umidade inicial do produto de 16 e 22 %.

A Fig. 24 e Tabela 12 ilustram um aspecto muito importante em relação ao requerimento específico de energia, para elevar e manter a temperatura do ar de secagem nos valores preestabelecidos.

O período em que as resistências elétricas permaneceram ligadas, aquecendo o ar, aumentou com o aumento da temperatura e fluxo do ar de secagem, passando de 23,5 % com o tratamento 40/12,5/0,5 para 68,3 % com o tratamento 60/25/0,5, com teor de umidade de 16 %. Com umidade inicial de 22 % a variação para os mesmos tratamentos foi de 16,9 e 67,3 % respectivamente.

Na relação entre o período em que as resistências permaneceram ligadas e o período total de secagem, houve interação significativa entre os fatores, temperatura, fluxo de ar e teor de umidade inicial do produto. A maior relação foi obtida quando se utilizou maior temperatura e fluxo de ar de secagem e, menor teor de umidade inicial do produto. Nos



fluxos de 12,5 e 18,0  $\text{m}^3/\text{min.m}^2$ , as médias do período em que as resistências permaneceram ligadas foram estatisticamente iguais.

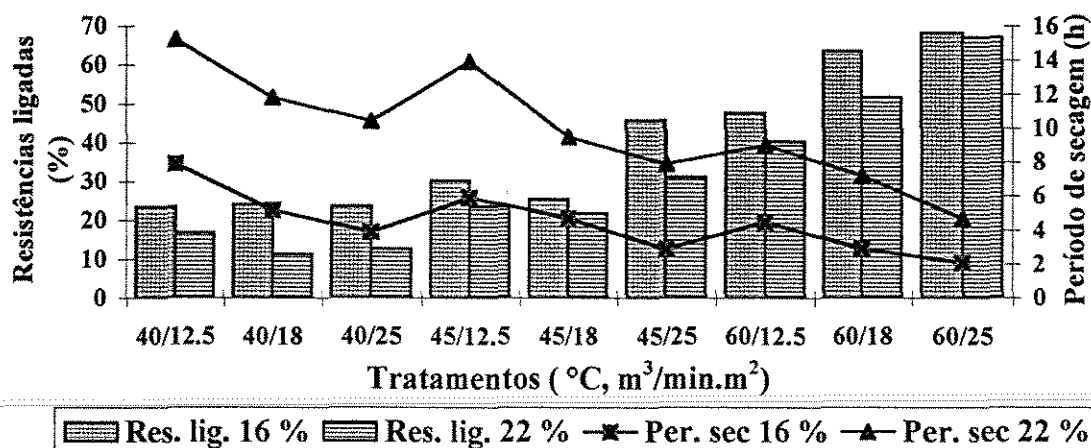


Figura 24 - Relação entre o período total de secagem e o período em que as resistências permaneceram ligadas, com os tratamentos de 16 e 22 % de umidade iniciais, para o milho-pipoca.

O aumento de temperatura exigiu mais das resistências para aquecer e manter aquecido uma mesma quantidade de ar. Para uma determinada temperatura, ao se aumentar o fluxo de ar, têm-se um maior volume de ar para ser aquecido num mesmo período de tempo, o que determina também uma maior quantidade de energia para o aquecimento do ar na temperatura desejada.

A demanda de energia foi muito menor quando se utilizou menores fluxos e temperatura do ar, porém, o período de secagem foi maior, o que pode não representar um menor consumo de energia. Torna-se necessário analisar a velocidade com que o produto será secado e as implicações que poderão ocorrer com a qualidade do produto final.

#### 5.3.2.2.6. Energia utilizada pelo ventilador

Neste item relacionou-se o total de energia requerida pelo sistema de secagem em MJ/kg de água evaporada e a quantidade de energia requerida pelo ventilador por kg de água evaporada em porcentagem.

O conhecimento da relação entre o total da energia requerida por kg de água evaporada e a requerida pelo ventilador é muito importante quando do planejamento de qualquer sistema de secagem. Um erro de escolha de um conjunto motor-ventilador, pode tornar um sistema de secagem ineficiente e até mesmo inviável economicamente em função da grande demanda de energia no processo de secagem e no investimento inicial.

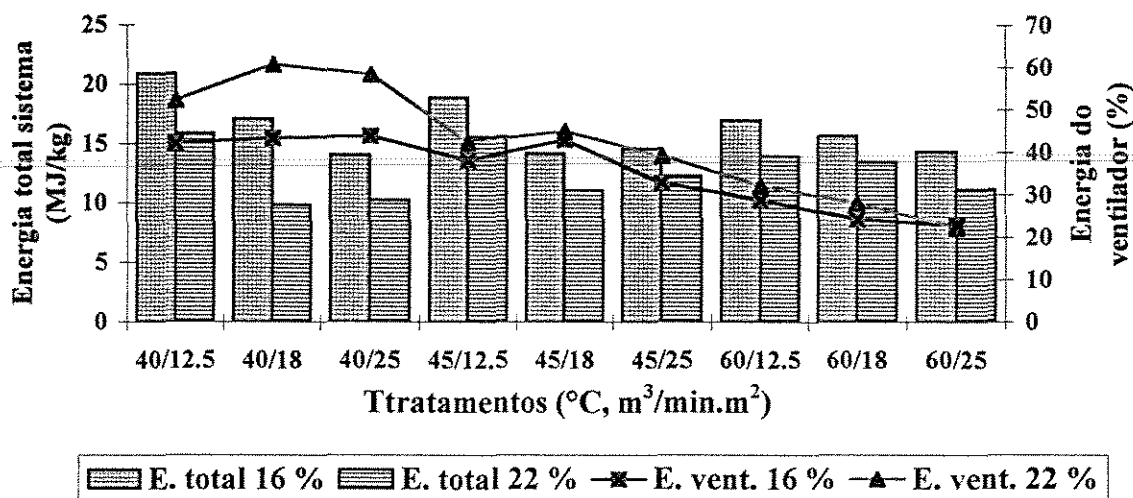


Figura 25 - Relação entre a energia total requerida pelo sistema de secagem e a requerida pelo ventilador por kg de água evaporada, para os tratamentos nos teores de 16 e 22 % de umidade iniciais, para 0,5 m de altura de camada, com o milho-pipoca.

A Fig. 25, mostra que a energia consumida pelo conjunto motor-ventilador alcançou até 60,6 % do total requerido para retirar um kg de água com o tratamento 40/18/0,5 e umidade inicial de 22 %, e 43,9 % com o tratamento 40/25/0,5 e umidade inicial de 16. %. Isto demonstra que quando se utiliza uma combinação de parâmetros de secagem como baixa temperatura e fluxo de ar de secagem, têm-se no ventilador o fator de maior consumo de energia do sistema de secagem.

A análise da variância mostrou que apenas o fator temperatura foi estatisticamente significativo e influenciou no comportamento da demanda de energia pelo ventilador em relação ao total, para se retirar um kg de água nos teores de umidade de 22 e 16 %. Este

mesmo comportamento foi obtido com a secagem do amendoim. As temperaturas de 40 e 45 ° C, foram estatisticamente iguais e também as que mais influenciaram na utilização de energia por parte do conjunto motor-ventilador. A menor relação foi obtida com a temperatura de 60 ° C. Para os fluxos utilizados no experimento, as médias da utilização de energia pelo ventilador, foram estatisticamente iguais, com tendência de diminuir esta relação com o aumento do fluxo de ar de secagem.

O total de energia requerida pelo sistema Fig. 25, teve um comportamento semelhante. Aumentando a temperatura e fluxo de ar, houve uma tendência de redução da energia requerida pelo sistema de secagem.

---

#### 5.3.2.2.7. Eficiência do processo de secagem do milho-pipoca

Na eficiência do processo de secagem, considerou-se a energia requerida para aquecimento do ar e o total de energia requerida pelo sistema de secagem, sendo a unidade expressa em MJ/kg de água evaporada.

A análise da variância mostrou que a temperatura e o teor de umidade inicial, foram os fatores que influenciaram de forma significativa na eficiência energética de secagem do milho-pipoca, sendo que os fluxos utilizados no experimento não foram significativos estatisticamente. A melhor eficiência foi obtida com temperatura de 40 ° C e teor de umidade inicial de 22 %, com tendência de reduzir a eficiência com o aumento da temperatura do ar de secagem. Em relação aos fluxos de ar utilizados, mesmo sendo estatisticamente iguais, tiveram uma tendência de melhorar a eficiência energética, com o aumento do fluxo de ar de secagem, conforme Fig. 26 e Tabela 13.

Os resultados obtidos em relação aos parâmetros, temperatura, fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial, mantiveram um perfil semelhante aos resultados obtidos com o amendoim. O aumento da temperatura de secagem, não representou uma melhor eficiência energética, o que está de acordo com YOUNG & DICKENS (1975), WALKER & BAKKER-ARKEMA (1978) e MARTINS & STROSHINE (1993) e não concorda com dados obtidos por NELLIST (1978), BROOKER *et al.* (1992) e BAKER *et al.* (1993). No entanto, trabalharam em condições diferentes das utilizadas no experimento, como;

produto, fluxo contínuo de produto e altas temperaturas de secagem. A tendência de melhorar a eficiência com o aumento do fluxo de ar, não está de acordo com os pesquisadores acima citados, onde todos afirmam que o aumento de fluxo de ar, reduz a eficiência energética de secagem.

Tabela 13 - Energia requerida em MJ/kg de água evaporada, em função do fluxo e temperatura do ar de secagem utilizados no experimento com milho-pipoca, umidade iniciais de 16 e 22 % respectivamente, e 0,5 m de altura de camada.

Fluxo de ar ( $\text{m}^3/\text{min.m}^2$ )	40 ° C		45 ° C		60 ° C	
	Eficiência sistema	Eficiência secagem	Eficiência sistema	Eficiência secagem	Eficiência sistema	Eficiência secagem
Umidade inicial = 16 %						
12,5	20,9	12,1	18,9	11,7	17,0	12,1
18,0	17,1	9,7	14,2	8,1	15,7	11,9
25,0	14,1	7,9	14,6	9,8	14,4	11,1
Umidade inicial = 22 %						
12,5	15,9	7,6	15,6	9,0	14,0	9,5
18,0	9,9	3,9	11,1	6,1	13,5	9,7
25,0	10,3	4,3	12,3	7,5	11,2	8,7

Na análise da eficiência do sistema de secagem, não houve diferença estatística para as médias do fator temperatura. A análise da variância indicou que apenas os fatores, fluxo do ar e teor de umidade inicial, influenciaram de forma significativa na eficiência do sistema. Os fluxos de 18 e 25  $\text{m}^3/\text{min.m}^2$ , foram estatisticamente iguais e os que obtiveram os melhores resultados. O fluxo de 12,5  $\text{m}^3/\text{min.m}^2$ , obteve a menor eficiência do sistema de secagem. Houve uma tendência de aumentar a eficiência do sistema com o aumento da temperatura de secagem, o que está de acordo com BAKKER-ARKEMA et al. (1978), MILLER & WHITFIELD (1984), NELLIST (1987) e BAKER et al. (1993). Esta tendência foi ocasionada pelo menor tempo de funcionamento do ventilador, quando se utilizou altas temperaturas de secagem, Fig 26 e Tabela 13.

Os resultados obtidos no experimento com o milho-pipoca, mantiveram a mesma tendência que os resultados obtidos com o amendoim, sendo que os tratamentos 40/18/0,5 e 40/25/0,5 e teor de umidade inicial de 22 % obtiveram os melhores resultados, com valores para a energia requerida de 3,9 e 4,3 MJ/kg de água retirada para a eficiência energética de secagem e 9,9 e 10,3 MJ/kg, para a eficiência do sistema.

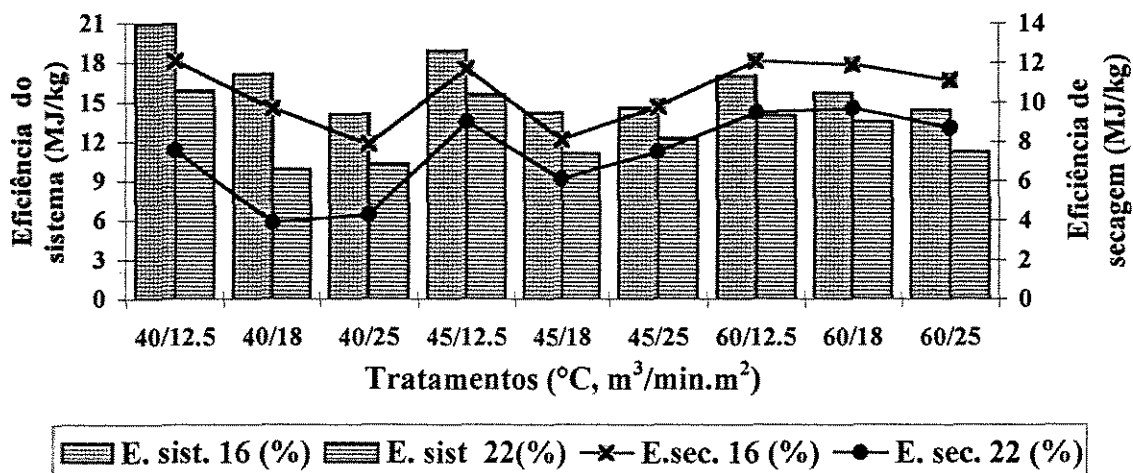


Figura 26 - Eficiência energética de secagem e eficiência do sistema de secagem com teores de umidade iniciais de 16 e 22 %, e camada de 0,5 m, com milho-pipoca.

Em relação a eficiência teórica de 2,5 MJ/kg, LASSERAN (1979), comparados com os valores da energia requerida em MJ/kg dos dois melhores tratamentos (40/18/0,5 e 40/25/0,5) com 22 % de umidade inicial, obteve-se respectivamente, 64,1 e 58,1 % para a eficiência energética de secagem e 25,3 e 24,3 % para a eficiência do sistema de secagem. Estes resultados foram semelhantes aos obtidos com o amendoim.

Os melhores resultados obtidos com o experimento do milho-pipoca, em relação à energia requerida, (MJ/kg de água retirada), estão dentro da faixa de 3,0 a 10,0 MJ/kg, citados por BAKKER-ARKEMA et al. (1978), NELLIST (1987) e BROOKER et al. (1992).

#### 5.3.2.2.8. Custos da secagem

Neste item, foram analisados os custos de secagem do milho-pipoca, em relação a energia utilizada para retirar um quilograma de água do produto. Foi feita uma análise comparativa entre a utilização da energia elétrica e combustíveis como a lenha e o bagaço de cana. Os valores referentes a energia elétrica, lenha e bagaço de cana foram obtidos no BOLETIM INFORMAÇÃO (08/94). Para o valor do kWh de R\$ 0,059, foi considerado a tarifa cobrada aos produtores rurais. Os preços do kW (energia elétrica) e kg (lenha e

tarifa cobrada aos produtores rurais. Os preços do kW (energia elétrica) e kg ( lenha e bagaço de cana), estão indicados com mais de duas casas após a virgula, pois o arredondamento poderia superestimar o custo da secagem.

Na análise da Tabela 14, houve uma inversão de valores, quando se determinou os custos de secagem com relação aos valores para a energia requerida no aquecimento e na movimentação do ar de secagem. Com o aumento da temperatura do ar de secagem, houve uma tendência de aumentar os custos relativos da energia requerida para o aquecimento do ar, e houve uma tendência de reduzir os custos pela utilização da energia por parte do conjunto motor-ventilador.

A análise da variância indicou que os fatores fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial influenciaram de forma significativa em relação aos custos totais para retirar um kg de água do produto. O maior custo foi obtido com o menor fluxo de ar de secagem e menor teor de umidade inicial do produto. As médias de custos para as temperaturas de 40, 45 e 60 ° C, foram estatisticamente iguais.

O maior custo de secagem por kg de água retirada ( R\$ 0,33), ocorreu com os tratamento 40/12,5/0,5, e umidade inicial de 22 %, isto é, com o menor fluxo e temperatura do ar de secagem. O menor custo obtido por kg de água retirada (R\$ 0,15), foi com o tratamento 40/18/0,5 e umidade inicial de 22 %.

Comparando o menor custo, de R\$ 0,15 por kg, com o maior custo, de R\$ 0,33 por kg, têm-se uma diferença de R\$ 0,18 por kg de água retirada, o que corresponde a 54,5 % a mais ou a menos, dependendo da condição de trabalho selecionada. Em uma secagem de grãos onde se retira 1000 kg de água, os custos podem variar de R\$ 150,00 a 330,00, para se realizar a mesma operação. Esta diferença de R\$ 180,00 para cada 1000 kg de água retirada, pode representar em muitas das vezes, o próprio lucro do produtor.

Tabela 14 - Custos da secagem do milho-pipoca , por kg de água retirada, nos diversos tratamentos, para umidade iniciais de 16 e 22 %, respectivamente, utilizando a energia elétrica como combustível.

Tratamentos	Energia requerida ( MJ/kg )			Valor/MJ ( R\$ )	Custos por kg de água (R\$ )		
	Resistência	ventilador	Total		Resistência	Ventilador	Total
Umidade inicial = 16 %							
60/12,5/0,5	12,1	4,9	17,0	0,016	0,19	0,08	0,27
60/18,0/0,5	11,9	3,8	15,7	0,016	0,19	0,06	0,25
60/25,0/0,5	11,1	5,3	16,4	0,016	0,18	0,08	0,26
45/12,5/0,5	11,7	7,2	18,9	0,016	0,19	0,11	0,30
45/18,0/0,5	8,1	6,1	14,2	0,016	0,13	0,10	0,23
45/25,0/0,5	9,8	4,8	14,6	0,016	0,16	0,08	0,24
40/12,5/0,5	12,1	8,8	20,9	0,016	0,19	0,14	0,33
40/18,0/0,5	9,7	7,4	17,1	0,016	0,16	0,12	0,28
40/25,0/0,5	7,9	6,2	14,1	0,016	0,13	0,10	0,23
Umidade inicial = 22 %							
60/12,5/0,5	9,5	4,5	14,0	0,016	0,19	0,08	0,27
60/18,0/0,5	9,7	3,8	13,5	0,016	0,16	0,06	0,22
60/25,0/0,5	8,7	2,5	11,2	0,016	0,14	0,05	0,18
45/12,5/0,5	9,0	6,6	15,6	0,016	0,14	0,11	0,25
45/18,0/0,5	6,1	5,0	11,1	0,016	0,10	0,08	0,18
45/25,0/0,5	7,5	4,8	12,3	0,016	0,12	0,07	0,19
40/12,5/0,5	7,6	8,3	15,9	0,016	0,12	0,13	0,25
40/18,0/0,5	3,9	6,0	9,9	0,016	0,06	0,09	0,15
40/25,0/0,5	4,3	6,0	10,3	0,016	0,07	0,09	0,16

Os dados mostram que os tratamentos mais eficientes em relação aos custos, foram os que utilizaram um maior fluxo de ar, independentemente da temperatura utilizada. Para uma mesma temperatura, tanto os custos referentes a energia requerida pelas resistências como pelo ventilador, diminuem com o aumento do fluxo do ar de secagem. Para um mesmo fluxo de ar, os custos de secagem relativos ao aquecimento do ar aumentam com o aumento da temperatura, enquanto os custos que se referem a movimentação do ar, diminuem com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Na Tabela 14 observa-se o quanto é importante selecionar adequadamente o conjunto motor mais ventilador. Quando se analisa os tratamentos com temperatura de 40 ° C, para todos os fluxos utilizados, os custos referentes ao ventilador são bem maiores que os custos relativos ao aquecimento do ar. O tratamento 40/25/0,5 e umidade de 22 % ,têm

um custo para a movimentação do ar de R\$ 0,09 por kg de água retirada, isto é, 28,6 % maior que o custo para o aquecimento do ar de secagem., que corresponde a R\$ 0,07 por kg de água retirada.

#### 5.3.2.2.8.1. Combustíveis alternativos - biomassa, uma analogia com a energia elétrica.

Dentro das condições experimentais, a análise de comparação dos combustíveis e seus custos, para retirar 1000 kg de água do produto, considerou os valores relativos à energia requerida para o aquecimento do ar de secagem, pois os custos com a movimentação do ar aquecido permanecerá o mesmo para qualquer combustível a ser utilizado. Na comparação dos custos para o produto seco, foram considerados também os custos para a movimentação do ar de secagem.

Os valores por kg de lenha (eucalipto), bagaço de cana e kWh de energia elétrica, foram obtidos do BOLETIM INFORMAÇÃO (08/94). Nos valores de energia elétrica, considerou-se a tarifa cobrada aos produtores rurais. Para a lenha, foi considerado como unidade comercial o metro cúbico estéril seco ( $m^3st$ ), igual a 450 kg, e o valor médio de R\$ 10,37 por  $m^3st$ , obtido de 9 regiões do estado de São Paulo. A unidade comercial do bagaço de cana foi a tonelada (t), com um valor de R\$ 8,49 por t.

Para a obtenção da quantidade de lenha e bagaço de cana necessária para evaporar 1,0 kg de água do produto, comparado com a energia elétrica consumida nos experimentos, utilizou-se o valor do PCI (Poder Calorífico Inferior) de 11,28 MJ/kg para o eucalipto seco ao ar e 6,69 MJ/kg para o bagaço de cana ANDRADE *et al.* (1984), considerando a eficiência média da fornalha de 60 %, SILVA *et al.* (1991).

Da mesma forma que a análise feita com o produto amendoim, e, considerando a possibilidade da sua utilização, o bagaço de cana seria a melhor opção a ser utilizada para a secagem do milho-pipoca (Tabela 15), sendo a energia elétrica a opção mais dispendiosa.

A análise da variância em relação as variáveis da Tabela 15, indicou que os fatores, temperatura do ar de secagem e teor de umidade inicial, influenciaram significativamente



na quantidade de lenha e bagaço de cana consumidos para retirar um quilograma de água do produto bem como nos seus respectivos custos e nos custos da utilização da energia elétrica.

Tabela 15 - Custos comparativos da energia requerida para aquecimento do ar através de energia elétrica, lenha e bagaço de cana, com o milho-pipoca, para teores de umidade iniciais de 16 e 22 % e 0,5 m de altura de camada.

Tratamentos	Ener. das resist. MJ/kg água	kg lenha por kg de água	kg bag. de cana por kg de água	Valor do kg de lenha ( R\$ )	Valor do kg de bag. cana ( R\$ )	Custos comparativos para retirar 1000 kg de água do milho-pipoca em (R\$)		
						lenha	bagaço	eletric.
Umidade Inicial = 16 %								
60/12,5	12,1	1,79	3,01	0.023	0,0085	41,17	25,59	190,00
60/18,0	11,9	1,76	2,96	0.023	0,0085	40,48	25,16	190,00
60/25,0	11,1	1,64	2,76	0.023	0,0085	37,77	23,46	180,00
45/12,5	11,7	1,73	2,91	0.023	0,0085	39,79	24,74	190,00
45/18,0	8,1	1,20	2,02	0.023	0,0085	27,60	17,17	130,00
45/25,0	9,8	1,45	2,44	0.023	0,0085	33,35	20,74	160,00
40/12,5	12,1	1,79	3,01	0.023	0,0085	41,17	25,56	190,00
40/18,0	9,7	1,43	2,42	0.023	0,0085	32,89	20,57	160,00
40/25,0	7,9	1,17	1,97	0.023	0,0085	26,91	16,74	130,00
Umidade inicial = 22 %								
60/12,5	9,5	1,57	2,37	0.023	0,0085	36,11	20,15	190,00
60/18,0	9,7	1,43	2,42	0.023	0,0085	33,89	20,57	160,00
60/25,0	8,7	1,37	2,16	0.023	0,0085	31,51	18,36	140,00
45/12,5	9,0	1,33	2,24	0.023	0,0085	30,59	19,04	140,00
45/18,0	6,1	0,90	1,52	0.023	0,0085	20,70	12,92	100,00
45/25,0	7,5	1,11	1,87	0.023	0,0085	25,53	16,74	120,00
40/12,5	7,6	1,12	1,89	0.023	0,0085	25,76	16,06	120,00
40/18,0	3,9	0,57	0,98	0.023	0,0085	13,11	8,33	60,00
40/25,0	4,3	0,63	1,07	0.023	0,0085	14,49	9,09	70,00

Os maiores custos e maiores quantidades de combustíveis foram registrados com a temperatura de 60 ° C e teor de umidade inicial de 16 %. Este aspecto, se deve, em função de que a eficiência energética de secagem foi melhor quando se utilizou o produto com maior teor de umidade inicial. As médias de custos dentro do fator fluxo do ar de secagem, foram estatisticamente iguais, com tendência de redução com o aumento do fluxo do ar.

Comparando-se os custos entre o tratamento 40/18/0,5 e umidade inicial de 22 %, o mais eficiente energeticamente, (3,9 MJ/kg de água evaporada), e o tratamento 60/12,5/0,5

e umidade inicial de 16 %, um dos menos eficientes energeticamente (12,1 MJ/kg) dos testes realizados, observou-se valores de R\$ 8,33, 13,11 e 60,00 para retirar 1000 kg de água, utilizando como fontes de aquecimento o bagaço de cana, a lenha e a energia elétrica respectivamente, para o tratamento 40/18/0,5 e umidade inicial de 22 % e valores de R\$ 25,59, 41,17 e 190,00 para o tratamento 60/12,5/0,5. Isto mostra que independentemente do combustível a ser utilizado sempre será possível se obter um processo de secagem com menores custos, quando se trabalha dentro das condições e parâmetros mais apropriados para cada produto.

A mesma consideração feita para o produto amendoim aplica-se também ao milho-pipoca, em relação as dificuldades na utilização de alguns combustíveis energéticos, como o bagaço de cana, em função da grande quantidade que necessita ser manejada, e da existência de fornalhas adaptadas que possam oferecer uma combustão completa para este tipo de combustível. Considerando os tratamentos anteriormente citados, utilizar-se-ia 3.010 kg de bagaço de cana e 1790 kg de lenha (3,98 m<sup>3</sup>st) para retirar 1000 kg de água, com o tratamento 60/12,5/0,5 e, 980 kg de bagaço de cana e 570 kg de lenha (1,27 m<sup>3</sup>st) com o tratamento 40/18/0,5, isto é, utilizando-se o tratamento mais eficiente energeticamente seria possível retirar 3000 kg de água na secagem do milho-pipoca com a mesma quantidade de combustível com que o tratamento 60/12,5/0,5 utilizaria para retirar 1000 kg de água.

#### 5.3.2.2.8.2. Custo da secagem do milho-pipoca, considerando o produto seco

A análise final dos custos operacionais de secagem, relativos ao amendoim, considerando o valor por 1000 kg de produto seco, Tabela 16, considera as condições iniciais e finais dos teores de umidade do milho-pipoca para cada tratamento, não sendo possível se fazer uma análise comparativa entre os tratamentos. Esta análise, além de indicar os custos operacionais, pode servir de instrumento para planejar e adequar a estrutura de secagem e armazenagem, bem como o escalonamento do plantio e colheita do produto.

A Tabela 16, mostra a quantidade de produto úmido que seria necessário secar para se retirar 1000 kg de água para cada tratamento. Da mesma forma que ocorreu com o amendoim, as quantidades de produto úmido são diferentes, em função de que os teores iniciais e finais de umidade não foram iguais para todos os tratamentos. Estes valores foram obtidos através da eq. (1).

Os custos operacionais de secagem com os combustíveis relacionados na Tabela 16, no tratamento 45/12,5/0,5 e 22 % de umidade inicial, seriam necessários R\$ 2,11, 1,19 e 1,09 para cada saca de 60 kg de produto seco, para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, o que corresponde a 9,17, 5,17 e 4,74 % do preço que o produtor receberia pelo produto, que é de R\$ 23,00 (Folha de São Paulo, 02/95), sendo um valor muito elevado para uma operação de secagem. Se esta comparação fosse possível ser extrapolada para o milho comum por exemplo, o valor de R\$ 2,11 por saca corresponderia 30,6 % do valor comercial, de R\$ 6,90 (Folha de São Paulo, 02/95), inviabilizando totalmente esta atividade.

Tabela 16 - Custos operacionais totais de secagem (ventilador + aquecimento do ar) do milho-pipoca considerando o produto seco, após a retirada de 1000 kg de água.

Tratamentos	U. I. (%)	U. F. (%)	Quantidade de produto úmido (kg)	Quantidade de produto seco(kg)	Custos de 1000 kg de produto seco (R\$)		
					energ.elétr.	lenha	bag cana
Umidade inicial = 16 %							
60/12,5/0,5	16,0	10,1	15.237	14.237	18,96	8,49	7,45
60/18,0/0,5	16,0	10,7	16.849	15.849	15,77	6,31	5,36
60/25,0/0,5	16,0	11,7	20.535	19.535	13,30	6,02	5,29
45/12,5/0,5	16,0	11,4	19.261	18.261	16,42	8,16	7,33
45/18,0/0,5	16,0	11,5	23.105	18.667	12,32	6,85	6,27
45/25,0/0,5	16,0	11,9	21.488	20.488	11,71	5,51	4,93
40/12,5/0,5	16,0	11,1	18.143	17.143	19,24	10,56	9,68
40/18,0/0,5	16,0	12,2	23.105	22.105	12,67	6,92	6,38
40/25,0/0,5	16,0	12,5	25.000	24.000	9,58	5,29	4,88
Umidade inicial = 22 %							
60/12,5/0,5	22,0	10,5	7.783	6.783	33,91	17,10	14,74
60/18,0/0,5	22,0	10,5	7.783	6.783	32,43	12,24	11,94
60/25,0/0,5	22,0	11,0	8.091	7.091	25,38	11,56	9,59
45/12,5/0,5	22,0	11,0	8.091	7.091	35,25	19,88	18,19
45/18,0/0,5	22,0	11,6	8.500	7.500	24,00	13,47	12,40
45/25,0/0,5	22,0	12,4	9.125	8.125	23,38	11,69	10,58
40/12,5/0,5	22,0	12,7	9.387	8.387	29,80	18,60	17,41
40/18,0/0,5	22,0	12,3	9.041	8.041	18,65	12,81	12,19
40/25,0/0,5	22,0	12,9	9.572	8.572	18,67	12,13	11,55

Os dados mostram que a energia elétrica é um combustível muito dispendioso, podendo ser utilizada em processo de secagem, apenas a nível de laboratório, onde permite melhor controle das temperaturas estabelecidas nos experimentos.

A Tabela 16 mostra outro fator importante, que foi o ponto em que se deve parar com o processo de secagem, ou seja, no teor de umidade final preestabelecido. No sistema de secagem em camada fixa, torna-se difícil determinar o ponto ideal para finalizar a operação de secagem, e isto pode implicar em prejuízos para o produtores rurais. Ao comparar por exemplo o tratamento 60/12,5/0,5 com o tratamento 40/25/0,5 e umidade inicial de 22 %, observou-se que os teores de umidades finais foram de 10,5 e 12,9 % respectivamente, com uma diferença de 2,4 pontos percentuais. Considerando os dois tratamentos, um produtor que processasse 1000 kg do produto nas condições do tratamento 60/12,5/0,5 estaria vendendo 24 kg a menos de produto seco que o tratamento 40/25/0,5, sendo um de valor de R\$ 9,20, valor suficiente para pagar os custos da secagem dos 1000 kg de produto quando se utilizar como combustível a lenha, sem considerar o maior custo de secagem que se teria para chegar a um teor de umidade menor.

A Fig. 27 mostra a proporção em que o conjunto motor-ventilador participa na composição dos custos totais do processo de secagem do milho-pipoca, considerando o produto seco, Tabela 16. A utilização de baixas temperaturas e fluxos de ar de secagem, tornam o ventilador como o principal fator na composição dos custos do processo de secagem. No tratamento 40/12,5/0,5, a proporção de custos relativa ao conjunto motor-ventilador, foi de 52,0, 83,3 e 89,0 % , para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana respectivamente. A medida em que diminui o valor do combustível utilizado para o aquecimento do ar, aumentou a proporção do ventilador na participação dos custos totais do processo de secagem.

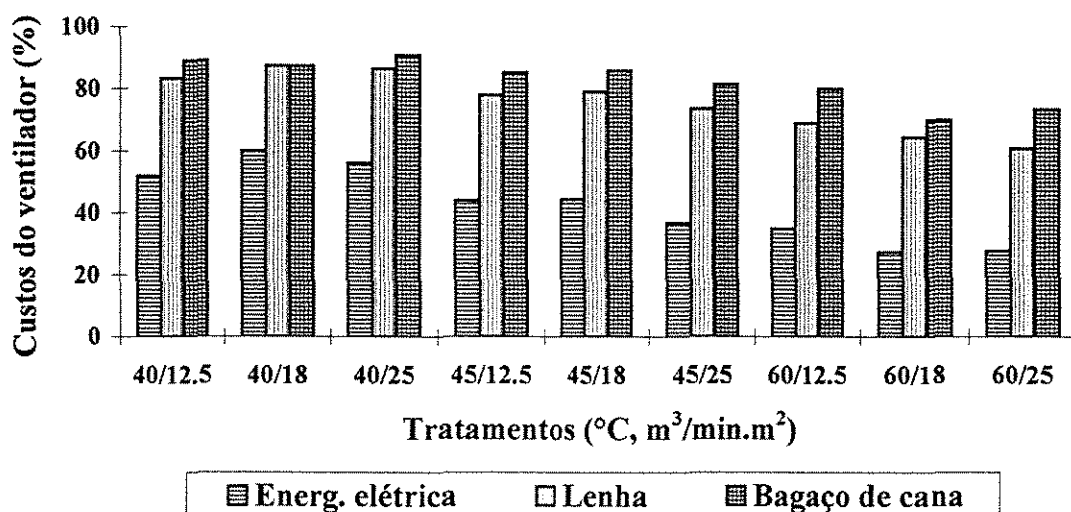


Figura 27 - Participação do ventilador em (%), nos custos totais, em 1000 kg de milho-pipoca seco, para a energia elétrica, lenha e bagaço de cana, umidade inicial de 22 % e altura de camada de 0,5 m.

Houve uma tendência de redução desta proporção, à medida em que se aumentou a temperatura do ar de secagem, Fig.27, em função de que, o requerimento de energia para aquecimento do ar para temperatura de 60 ° C, foi muito maior do que na temperatura de 40 ° C, reduzindo assim a proporção entre os custos relativos ao aquecimento e da movimentação do ar de secagem.

Todos os aspectos relevantes, discutidos nesta análise, indicam a grande necessidade que se tem em desenvolver melhor os equipamentos existentes e em uso no país. A busca de equipamentos que sejam eficientes técnica, energética e economicamente, é sem dúvida, um dos papéis fundamentais das indústrias e instituições de pesquisa.

### 5.3.2.3. Qualidade do milho-pipoca

Entre os muito fatores que podem afetar a qualidade do milho-pipoca, foram avaliados os aspectos visuais como coloração e trincamento dos grãos, peso específico aparente e a capacidade de expansão, em função dos diversos parâmetros de secagem.

Na avaliação visual comparativa entre os parâmetros utilizados, foi possível constatar que o sistema de secagem em camada fixa fez com que os tratamentos com temperatura de 60 ° C, para todos os fluxos utilizados, tivessem perda de coloração dos grãos do milho-pipoca, tornado os grãos sem brilho e esbranquiçados, principalmente na camada inferior da coluna de secagem, tanto para o teor de 16 % como para o produto com umidade inicial de 22 %. Este aspecto pode levar a uma depreciação do produto, quando da sua comercialização. Quando se utilizou temperaturas de 40 e 45 ° C, o produto manteve suas características praticamente inalteradas.

---

#### 5.3.2.3.1. Grãos trincados

Neste item foi analisado a influência da temperatura, fluxo do ar de secagem e teor de umidade inicial, no percentual de grãos trincados, ocorridos durante o processo de secagem do milho-pipoca. A correlação existente entre os fatores de qualidade do produto e as condições de secagem, tem sido utilizada para avaliar o processo de secagem. O percentual de grãos trincados, é um indicador de qualidade e pode ser associado as variações das condições de secagem dos produtos.

A Tabela 17 e a Fig. 28, mostram que houve uma tendência de aumentar o percentual de grãos trincados com o aumento da temperatura e fluxo de ar de secagem e teor de umidade inicial do milho-pipoca.

Na Tabela 17, observa-se que, mesmo com baixas temperaturas, detectou-se um grande percentual de grãos trincados na primeira camada de grãos. A velocidade do resfriamento do produto no final da secagem pode ser uma das causas, pois a camada inferior, recebe um choque térmico maior, a medida em que os grãos quentes entram em contato com o ar ambiente. Nos tratamentos com temperaturas de 40 ° C, nos dois teores de umidade pesquisados conforme a Tabela 17 e Fig. 28, não houve diferenças significativas no número de grãos trincados, mesmo quando o produto esteve na câmara de

secagem por um maior tempo de permanência. Com 45 e 60 ° C , o produto com umidade inicial de 22 % apresentou um percentual maior de grãos trincados se comparado com o milho-pipoca a 16 %. Este aspecto pode ser relacionado com o menor gradiente de temperatura observado na coluna de secagem, quando se utilizou um maior teor de umidade (22 %), Fig. 21, onde toda a massa de grãos alcançou uma temperatura mais elevada no final da secagem, resultando em fator prejudicial à qualidade dos grãos.

Tabela 17 - Grãos trincados em função do processo de secagem do milho-pipoca, para os teores de umidade de 16 e 22 % respectivamente, e 0,5 m de altura da camada.

GRÃOS TRINCADOS (%)								
U.I. = 16 %					U.I. = 22 %			
Altura de camada (cm)					Altura de camada (cm)			
Tratamentos	0 - 5	20 - 25	45 - 50	Média	0 - 5	20 - 25	45 - 50	Média
60/12,5/0,5	89	82	10	60,3	94	83	48	75,0
60/18,0/0,5	93	77	13	61,0	85	87	38	70,0
60/25,0/0,5	93	92	37	74,0	92	75	65	85,2
45/12,5/0,5	73	47	zero	40,0	80	62	3	48,3
45/18,0/0,5	80	62	zero	47,3	85	62	10	52,3
45/25,0/0,5	75	34	zero	36,3	86	70	8	54,7
40/12,5/0,5	60	9	zero	23,0	60	29	zero	29,7
40/18,0/0,5	68	17	3	29,3	60	32	zero	30,7
40/25,0/0,5	62	28	zero	30,0	66	30	2	32,0

A análise da variância indicou que apenas a temperatura e o teor de umidade inicial influenciaram significativamente no percentual de grãos trincados do milho-pipoca. O maior percentual de grãos trincados foi obtido com a temperatura de 60 ° C e com teor de umidade inicial de 22 %. Para as médias de grãos trincados em relação ao fluxo de ar, foram estatisticamente iguais, com tendência de aumentar com o aumento deste.

O trincamento dos grãos, a princípio não influenciou na capacidade de expansão do milho-pipoca. Esta afirmação baseia-se nos resultados obtidos por DALBELLO *et al.* (1995), no qual afirmam que obtiveram os melhores resultados da capacidade da expansão,

na altura de camada de até 5 cm, sendo que, foi nesta camada de grãos que se registrou o maior percentual de grãos trincados

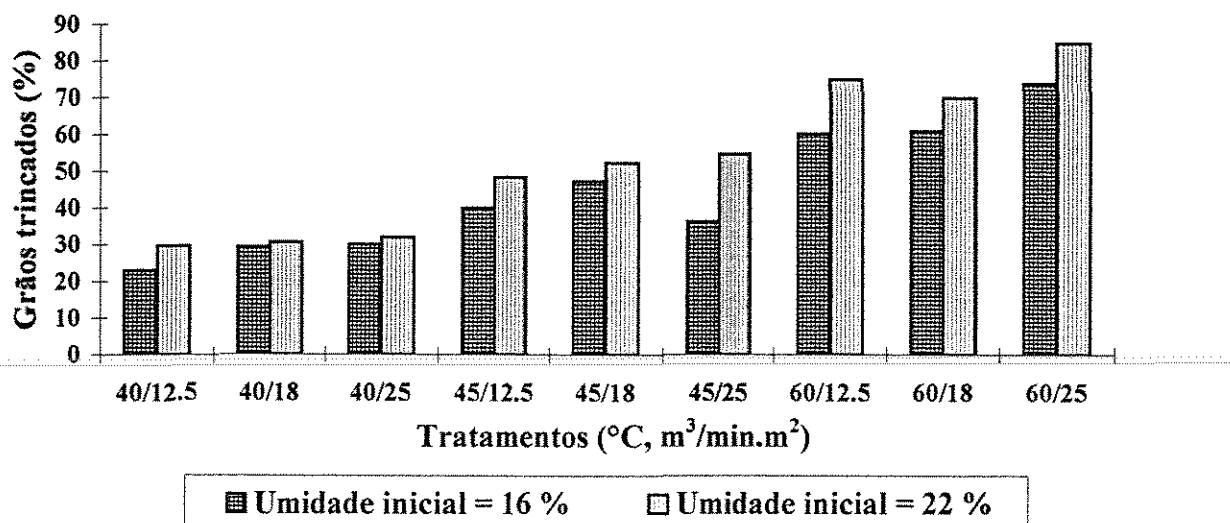


Figura 28 - Valores médios de grãos trincados do milho-pipoca, na coluna de secagem, em função da temperatura e fluxo do ar de secagem e umidade de 16 e 22 %, para altura de camada de 0,5 m.

Considera-se o trincamento dos grãos um fator que pode influenciar na deterioração do produto, tornando-o mais suscetível a quebras e menos resistentes aos impactos mecânicos na fase de manuseio e armazenamento, podendo facilitar ainda o reumedecimento e a infestação por microorganismos e insetos.

#### 5.3.2.3.2. Capacidade de expansão do milho-pipoca.

Neste item foi avaliada a capacidade de expansão do milho-pipoca para 7 diferentes níveis de teor de umidade final, na faixa de 9 a 15 %, e três diferentes tamanhos de grãos, e a sua relação com o peso específico aparente do milho-pipoca. O peso específico foi determinado para cinco diferentes níveis de umidade (11,16,19,22 e 23 %) onde foram obtidos os valores de 870, 832, 820, 784 e 770 kg/m³ de produto, respectivamente. Os



dados mostram que o peso específico diminuiu com o aumento do teor de umidade. Esta relação está diretamente vinculada a capacidade de expansão do milho-pipoca, sendo que a maior capacidade de expansão ocorre com o maior peso específico do produto, o que concorda com HAUG *et al.* (1976). Os valores experimentalmente obtidos foram ajustados a uma equação linear, eq.(6), com um  $R^2$  de 98,4 %.

$$Pe = 962,95 + (- 8, 13) U \quad (6)$$

onde:

$Pe$  = peso específico do milho-pipoca, (kg/m<sup>3</sup>)

$U$  = teor de umidade inicial, (%)

A análise da variância, indicou que houve interação significativa entre os fatores, teor de umidade final do produto e tamanho dos grãos em relação a capacidade de expansão do milho-pipoca. Isto se deve em função de que o produto com menor tamanho (menor que peneira 15), e maior teor de umidade final, teve uma maior capacidade de expansão que os grãos maiores, Tabela 18.

Quando se utilizou os grãos de maior tamanho, maior e igual a peneira 15, o teste Tukey mostra que nos níveis de umidade final de 09, 10 e 11 %, as médias foram estatisticamente iguais. Sendo que o melhor resultado da capacidade de expansão foi obtido com o milho-pipoca a 10 % de umidade final com um valor de 32,77 cm<sup>3</sup>/g e o pior resultado, 8,40 cm<sup>3</sup>/g, com o produto a 15 % de umidade final, Tabela 18.

Tabela 18 - Teste Tukey para médias da capacidade de expansão do milho-pipoca, para diferentes tamanhos de grãos, na faixa de 09 a 15 % de teor de umidade final.

Número de ordem	Capacidade expansão Peneira $\geq 15$ ( cm <sup>3</sup> /g)			Capacidade expansão Peneira $< 15$ (cm <sup>3</sup> /g)			Capacidade expansão sem classific.(cm <sup>3</sup> /g)		
	umidade	médias	5 %	umid.	médias	classif	umidad	médias	classif.
01	10 %	32,77	a	11 %	31,89	a	10	33,01	a
02	11 %	31,76	a	10 %	30,86	a	11	31,69	ab
03	09 %	30,25	a	09 %	30,45	a	09	29,04	b
04	12 %	27,44	b	12 %	29,41	a	12	28,68	b
05	13 %	18,37	c	13 %	21,27	b	13	19,46	c
06	14 %	16,92	c	14 %	17,57	c	14	16,98	c
07	15 %	8,40	d	15 %	9,57	d	15	8,42	d

Diferença mínima significativa a 5 % = 3,82

Para os grãos menores, os que passaram pela peneira 15, as médias da capacidade de expansão foram estatisticamente iguais nos níveis de umidade final de 09, 10, 11 e 12 %, Tabela 18. O melhor resultado,  $31,89 \text{ cm}^3/\text{g}$ , foi obtido com o produto a 11 % de umidade final e o pior,  $9,57 \text{ cm}^3/\text{g}$ , com umidade final do produto a 15 %.

Na análise do produto sem passar pela classificação, as médias para a capacidade de expansão foram estatisticamente iguais nos teores de umidade de 10 e 11 % e também nos teores de 11, 9 e 12 %. O melhor resultado,  $33,01 \text{ cm}^3/\text{g}$ , foi obtido com o produto a 10 % de umidade e o pior,  $8,42 \text{ cm}^3/\text{g}$ , com 15 % de umidade final, Tabela 18, Fig. 29.

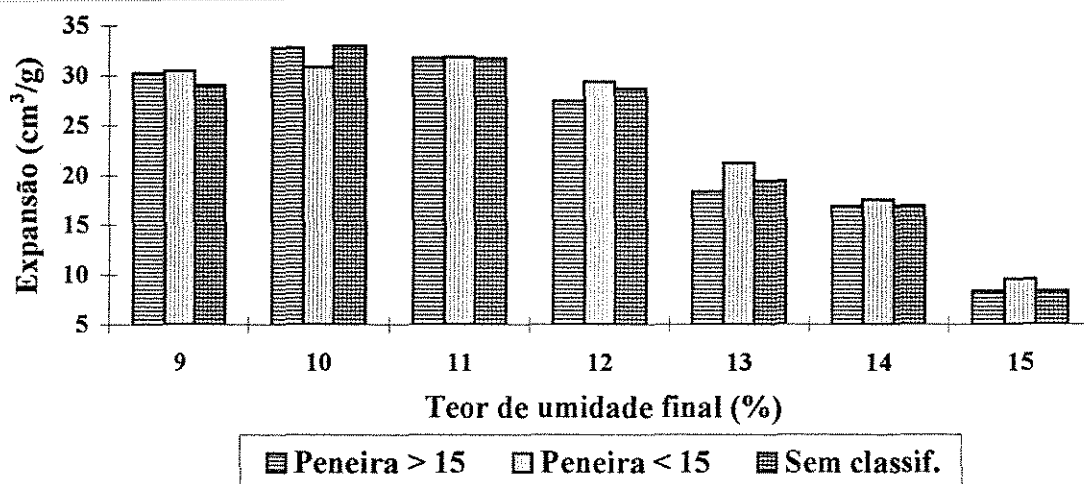


Figura 29 - Capacidade de expansão do milho-pipoca, para tamanho de grãos (peneira  $\geq$  15, peneira < que 15 e produto sem classificação), na faixa de teor de umidade final de 09 a 15 %.

A maior capacidade de expansão foi obtida com o produto na faixa de umidade de 10 a 11 %, conforme Tabela 18 e Fig. 29, o que concorda SAWAZAKI et al. (1986) E DALBELLO et al. (1995), que obtiveram os melhores resultados na faixa de 10,5 a 11,5 % de teor de umidade. O ponto de inflexão foi com o teor de umidade final de 10 %, a partir desta umidade houve uma tendência de queda nos dois sentidos, tanto aumentando como diminuindo a umidade do produto. Esta característica possibilitou, para a variedade e

no intervalo de umidade pesquisada, considerando o produto sem classificação, ajustar os dados a uma equação de terceiro grau com um  $R^2$  de 99,02 %, eq. (7).

$$Y = -426,598 + 112,68 U + (-8,87 U^2) + 0,22 U^3 \quad (7)$$

onde:

$Y$  = capacidade de expansão ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

$U$  = teor de umidade final do produto ( % )

A queda da capacidade de expansão com teores de umidade a partir de 13 % foi muito acentuada, aparecendo um maior número de grãos sem expandir e pipocas pequenas, mal expandidas. Este aspecto torna-se de fundamental importância quando se faz uma análise dos custos da secagem. do ponto de vista do produtor de grãos, a secagem além dos 13 %, (teor ideal para o armazenamento), reduz a quantidade de produto a ser vendido e aumenta os custos da secagem, como pode ser visto na Tabela 16. Do ponto de vista de quem vende na forma de pipoca, a análise passa a ter outro enfoque, considerando os tratamentos 60/25/0,5 e 40/25/0,5, onde os teores de umidade estão em 10,5 e 12,9 % respectivamente, 1000 kg de milho-pipoca secos nestas condições renderia 110.333 pacotes de pipoca de  $300 \text{ cm}^3$  com o produto a 10,5 % e 64.886 pacotes de pipoca com o produto a 13 % de umidade final, isto é, seriam necessários estourar mais 701 kg de grãos de pipoca para alcançar os mesmos 110.333 pacotes de  $300 \text{ cm}^3$  cada. O que é o ideal para o produtor, será um péssimo negócio para quem transforma os grãos em pipoca. Para o pipoqueiro, justifica economicamente, assumir os custos e perdas do produtor de grãos em função do maior período de secagem, para obter um produto na faixa de umidade de 10 a 11 %.

Outro aspecto a ressaltar, foi de que não houve diferenças significativas na capacidade de expansão do milho-pipoca entre os três tamanhos de grãos pesquisados, Tabela 18, com pequena vantagem para o produto sem classificação, que obteve o melhor resultado,  $33,01 \text{ cm}^3/\text{g}$ , com teor de umidade de 10 %. Isto leva a concluir que não se justifica passar o milho-pipoca por um processo de classificação.

#### 5.3.2.4. Conclusões referentes ao processo de secagem do milho-pipoca.

Os gradientes de umidade e temperatura, na coluna de secagem, com milho-pipoca, aumentaram com o aumento da temperatura e reduziram com o aumento do fluxo de ar de secagem. O maior teor de umidade proporcionou um maior gradiente de umidade e um menor gradiente de temperatura na coluna de secagem.

---

A taxa de secagem do milho-pipoca aumentou com o aumento da temperatura e fluxo de ar de secagem.

Com temperatura de 40 ° C, o ventilador foi um dos principais fatores de utilização de energia durante o processo de secagem.

A utilização da energia elétrica como principal fonte de energia para aquecimento do ar de secagem é inviável para a secagem de produtos agrícolas.

A eficiência energética de secagem, melhorou para o produto com o maior teor de umidade inicial, sendo o melhor resultado obtido com o tratamento 40/18/0,5 com um valor de 3,9 MJ/kg de água retirada de energia requerida. A eficiência energética de secagem aumentou com o aumento do fluxo de ar e diminuiu com o aumento da temperatura de secagem.

Para um mesmo fluxo de ar, houve um tendência de melhorar a eficiência do sistema de secagem com o aumento da temperatura, e para uma mesma temperatura de secagem houve a tendência de aumentar a eficiência do sistema de secagem com o aumento do fluxo de ar de secagem. O melhor resultado em relação à energia requerida,(9,9 MJ/kg), foi obtido com o tratamento 40/18/0,5 e 22 % de umidade inicial. O maior teor de umidade resultou na melhor eficiência do sistema.

O menor custo de secagem, em relação aos combustíveis alternativos, para retirar 1000 kg de água do produto, foi obtido com o tratamento 40/18/0,5, com valores de R\$

60,00 13,11 e 8,33, para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.

O menor custo de secagem, em relação ao produto seco após a retirada de 1000 kg de água, foi obtido com o tratamento 45/25/0,5, e umidade inicial de 16 %, com valores de R\$ 9,58, 5,29 e 4,88 para os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.

A temperatura de 60 ° C, provocou descoloração e um maior percentual de grãos trincados no milho-pipoca.

Os tratamentos com temperatura de 40 ° C, para qualquer fluxo, mantiveram a coloração inalterada e reduziu o número de grãos trincados.

A melhor capacidade de expansão do milho de pipoca foi obtida na faixa de 10 a 11 % de teor de umidade final. A partir desta faixa a capacidade de expansão diminuiu com o aumento do teor de umidade final do produto.

A capacidade de expansão do milho-pipoca, sem classificação, foi estatisticamente igual aos resultados obtidos com os grãos maiores e iguais a peneira 15 e aos grãos menores que a peneira 15, não justificando a sua classificação.

Os melhores resultados, em relação a uniformidade de secagem, a eficiência energética e qualidade do produto, foram obtidos com a temperatura de 40 ° C e fluxo de 18 e 25 m<sup>3</sup>/ min. m<sup>2</sup>.

O modelo (  $Y = B0 + BIT + B2F$  ) mostrou-se apropriado a nível de 5 % de significancia para representar a taxa de secagem do milho-pipoca, e o modelo (  $Y = B0 + BIT + B2F + B3U$  ) foi adequado para representar os gradientes de umidade e temperatura final para o milho-pipoca.. Os dois modelos apresentaram ótima correlação com os dados experimentais. Os modelos não foram adequados para representar os demais itens pesquisados para o milho-pipoca.

Os modelos (  $Y = a + bU$  ) e (  $Y = a + bU + cU^2 + dU^3$  ), mostraram-se excelentes para representar respectivamente, o peso específico e a capacidade de expansão do milho-pipoca, em função do teor de umidade do produto.

## 6. CONCLUSÕES

Os gradientes de umidade e temperatura, na coluna de secagem, para o amendoim e milho-pipoca, aumentaram com o aumento da temperatura e reduziram com o aumento do fluxo de ar de secagem. O maior teor de umidade inicial proporcionou um maior gradiente de umidade e menor gradiente de temperatura na coluna de secagem.

A taxa de secagem do amendoim e milho-pipoca aumentou com o aumento da temperatura e fluxo de ar de secagem.

Com temperatura de 40 ° C, o ventilador foi um dos principais fatores de utilização de energia durante o processo de secagem, para os dois produtos estudados.

A utilização da energia elétrica como principal fonte de energia para aquecimento do ar de secagem é inviável para a secagem de produtos agrícolas.

A eficiência energética de secagem para o amendoim e milho-pipoca foi melhor quando se utilizou o produto com maior teor de umidade inicial, sendo que o melhor resultado obtido para o amendoim, foi com o tratamento 40/25/1,0 com um valor de 3,7 MJ/kg de energia requerida, e para o milho-pipoca, com o tratamento 40/18/0,5, sendo o valor da energia requerida de 3,9 MJ/Kg de água retirada. A eficiência energética de secagem para o amendoim e milho-pipoca aumentou com o aumento do fluxo de ar e diminuiu com o aumento da temperatura de secagem.

Para um mesmo fluxo de ar, nos dois produtos pesquisados, houve uma tendência de melhorar a eficiência do sistema de secagem com o aumento da temperatura, e para uma mesma temperatura de secagem houve a tendência de aumentar a eficiência de secagem com o aumento do fluxo de ar de secagem. Os melhores resultados em relação à energia requerida, ( 7,4 e 9,9 MJ/kg), foram obtidos com os tratamentos 40/25/1,0 e 18 % de

umidade inicial e 40/18/0,5 e 22 % de umidade inicial, para o amendoim e milho-pipoca respectivamente. O maior teor de umidade resultou na melhor eficiência do sistema.

O menor custo de secagem, em relação aos combustíveis alternativos, para retirar 1000 kg de água do produto, foi obtido com os tratamentos 40/25/1.0 e 40/18/0,5, com valores de R\$ 60,00, 12,65 e 7,82 para o amendoim e 60, 13,11 e 8,33, para o milho-pipoca com os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.

O menor custo de secagem, em relação ao produto seco após a retirada de 1000 kg de água, foi obtido com os tratamentos 45/18/0,5 (amendoim) e 40/25/0,5 e umidade inicial de 16 % (milho-pipoca), com valores de R\$ 7,44, 4,07 e 3,72 para o amendoim, R\$ 9,58, 5,29 e 4,88 para o milho-pipoca, com os combustíveis; energia elétrica, lenha e bagaço de cana, respectivamente.

Os fatores de qualidade de amendoim analisados como grãos partidos, película solta e vagens abertas, mantiveram uma tendência de reduzir a qualidade com o aumento de temperatura e do fluxo de ar de secagem. A temperatura de 60 ° C foi prejudicial a qualidade do amendoim.

Os resultados obtidos indicam que foi possível utilizar temperaturas de até 45 ° C, sem que houvesse prejuízo da qualidade do amendoim.

Os melhores resultados em relação a uniformidade de secagem, eficiência energética e qualidade do produto foram obtidos com temperatura de 40 ° C, e fluxo de ar de 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>, com altura de camada de 1,0 m para o amendoim e temperatura de 40 ° C e fluxo de 18 e 25 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> e 0,5 m de altura da camada, para o milho-pipoca.

A temperatura de 60 ° C, provocou descoloração e um maior percentual de grãos trincados no milho-pipoca. Os tratamentos com temperatura de 40 ° C, para qualquer fluxo, mantiveram a coloração inalterada e reduziu o número de grãos trincados.

A melhor capacidade de expansão do milho de pipoca foi obtida na faixa de 10 a 11 % de teor de umidade final. A partir desta faixa a capacidade de expansão diminuiu com o aumento do teor de umidade final do produto.

A capacidade de expansão do milho-pipoca, sem classificação, foi estatisticamente igual aos resultados obtidos com os grãos maiores e iguais a peneira 15 e aos grãos menores que a peneira 15, não justificando a sua classificação.

O modelo (  $Y = B_0 + B_1T + B_2F$  ) mostrou-se apropriado a nível de 5 % de significancia para representar a taxa de secagem do milho-pipoca e vagens abertas para o amendoim, e o modelo (  $Y = B_0 + B_1T + B_2F + B_3U$  ) foi adequado para representar os gradientes de umidade e temperatura final para o milho-pipoca.. Os dois modelos apresentaram ótima correlação com os dados experimentais.

Os modelos (  $Y = a + bU$  ) e (  $Y = a + bU + cU^2 + dU^3$  ), mostraram-se excelentes para representar respectivamente, o peso específico e a capacidade de expansão do milho-pipoca, em função do teor de umidade do produto.



## 7. SUMMARY

### DRYING PROCESS EFFICIENCY OF PEANUT (*Arachis hypogaea* L.) and POPCORN (*Zea mays* L.)

---

The artificial drying process is fundamental for agriculture modernization, and is a pre-condition to store products for long periods of time. Grain drying is an energy intensive and expensive operation. The performance of grain dryers has been measured generally in terms of drying capacity only. In a few cases the energy efficiency are indicated. In the drying process efficiency analysis the energetic, economic and qualitative aspects were considered. The peanut is an excellent food source, supplying raw material for industrialization. The peanut main problem, has been the lack of suitable drying equipment and storage facilities. The popcorn is used exclusively for human consumption. However, there are few information about popcorn. The objectives of this work were: to evaluate the influence of the drying parameters; drying air temperature, air flow, product initial moisture content and bed depth, on the drying process efficiency and the peanut and popcorn qualities. The experiments were conducted at the UNICAMP/FEAGRI Drying Laboratory, with a stationary bed dryer. The experimental conditions were: drying air temperatures (40; 45 and 60 ° C); air flows (12,5 ; 18,0 and 25,0 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>); bed depths ( 0,5 and 1,0 m for peanut, and 0,5 m for popcorn), and initial moisture content (from 18,5 to 12,0 % for peanut, and 16 and 22 % for popcorn). The results showed that the treatments with temperature of 40 ° C, air flow of 18,0 and 25,0 m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup> and initial moisture content of 18 % for peanut and 22 % for popcorn, gave better drying process efficiency, and products quality. The drying air temperature of 60 ° C, reduced the peanut and popcorn qualities. The data showed that it was possible to work with temperature of 45 ° C, without reduction of the products quality. The best results in terms of the economic efficiency, was obtained, when the products initial moisture content, was 12 % for peanut and 16 % for

popcorn. During the drying process, the fan was the major factor of energy utilization, when the drying air temperatures ranged from 40 to 45 ° C. The results showed that popping expansion volume was affected by the final moisture content. The maximum expansion volume was obtained when the final moisture content ranged from 10 to 11 %.

---

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. B., SASSERON, J. L., OLIVEIRA, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas.** CENTREINAR, Viçosa, MG, 37 p. 1984.

BAKKER-ARKEMA, F.W., BROOK, R.C., BROOKER, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers.** St. Joseph, MI : ASAE, 1978. 14 P. Paper n. 78-3532

BAKER, K. D., PAULSEN, M. R., ZWEDEN, J. V. Temperature effects on seed corn dryer performance. **Applied Engineering in Agriculture**, ASAE, v. 9 (1), 1993. p. 79 - 83.

BIAGI, J. D., VALENTINI, S. R. T., QUEIROZ, D.M. Secagem de produtos agrícolas, In: **Introdução à Engenharia Agrícola**/ Luiz Augusto Cortez, Paulo Sérgio G. Magalhães (Coord.). Campinas, S. P. Ed. da UNICAMP, 1993.

BOLETIM INFORMAÇÃO. **Agência Para Aplicação de Energia**, CESP, CPFL, ELETROPAULO E COMGAS. São Paulo, S.P. n. 32, 07/08, 1994. 4 p.

BOLSA DE CEREAIS DE SÃO PAULO. **Folha de São paulo**, S. P., cotação de 13 de fev. 1995.

BOLSA DE CEREAIS DE SÃO PAULO. **Estado de São Paulo**, Mercados, 4 de maio de 1995. p. B 21.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** VAN NOSTRAND REINOLD, New York, 1992. 450 p.

BRUNSON, A. M. Popcorn. 1955 In: SPRAGUE G. F. **Corn and corn improvement.** Academic Press Inc. Publishers New york, N. Y. 1955. p. 423 - 439.

CANECCHIO, V. **Cultura do amendoim.** Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, S. P. 1987. 40 p.

COFFELT, T. A. Peanut. In: ROBBELER, G. et al. **Oil crops of the world.** Their breeding and utilization. New York, McGraw-Hill, 1989. cap 15.

- DALBELLO, O., PREVIERO, C. A., ALVES, D. G., BIAGI, J. D. Capacidade de expansão do milho-pipoca (*Zea mays* L.) em função de parâmetros de secagem, umidade e armazenamento do produto. In: XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Viçosa, Minas Gerais. 1995. 16 p.
- DALPASQUALE, V. A. Secagem a altas temperaturas. **CENTREINAR**, Viçosa - MG. 1984. Datilografado, 29 p.
- FORTES, M. and OKOS, M.R. Drying theories; theirs bases and limitations as applied to foods and grains. IN: **ADVANCES IN DRYING**. ARUN S. MUJUNDAR (editor). McGill University, Montreal. v. 1 (5), 1980. p. 119 - 153.
- GUALBERTO, J. A. G. **Efeitos de parâmetros de secagem na qualidade de amendoim (*Arachis hypogaea* L) Previamente aerado**. Campinas: UNICAMP, 1990. 29 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola em andamento. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1990.
- HAUGH, C. G., LIEN, R. M.; HANES, R. E., ASHMAN, R. B. Physical properties of popcorn. **TRANSACTIONS of the ASAE**, St. Joseph, MI. 1976, v. 19, n. 1, p. 168-171.
- HENDERSON, S.M and PERRY, R. L. **Agricultural process engineering**. The Avi Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. U.S.A. Third Edition, 1976. 442 p.
- IBGE, 1994. Anuário Estatístico do Brasil 1994. Fundação Instituto brasileiro de Geografia e Estatística, RJ, v. 51. p 509 - 510.
- KUNZE, O.R. et al. Continuous and intermittent drying of peanuts under vacuum. **Trans. ASAE**, St. Joseph, MI, 11 (6), 1968. p. 783 - 787.
- LACERDA, A. F., QUEIROZ, D. M., ROA, G. Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 7, n. 1, p. 24-34, jun. 1982.
- LAI, F. S., FOSTER, G. H. **Improvement in grain- dryer fuel efficiency through heat recovery**. St. Joseph, MI: ASAE, 1977. 6 p. Paper n. 75-3517.
- LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 3, 1978. 46 p.
- LASSERAN, J. C. Combustíveis e geradores de ar quente. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, 1979. 4(2): p. 75 - 88.
- LI, H., MORREY R. V. Thin layer drying of yellow dent corn. **Transactions of the ASAE**, 1984. v. 27(1), p. 581 - 585.
- LIEN, R. M., HAUGH, C. G. The effect of field shelling on popcorn quality. **Trasactions of the ASAE**, 1975. v. 18(5), p. 855 - 858.

MARTINS, J. H., STROSHINE, R. L. Otimização do efeito de variedade do milho híbrido sobre eficiência de secagem a altas temperaturas. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus, Bahia, 1993. **Anais**. Ilhéus, SBEA, CEPLAC, v. 2, 1993. p. 1337 - 1358.

MEDEIROS FILHO, S. de. **Medição de energia elétrica**, 3a. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983. 483 p.

MERLO, E., FILHO FORNASIERI, D., LAM-SÁNCHEZ, A. Avaliação de sete cultivares de milho-pipoca (*Zea mays*, L.) em três densidades de semeadura. **Científica**, São Paulo. 1988, p. 245-51.

MEYER, A. J., VILA, G. L., ROA, G. et al. Energia para a secagem de produtos agropecuários. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 4, p. 5-14, 1982.

MILLER, P. C. H., WHITFIELD, R. D. The predicted performance of a mixed-flow grain drier. **Journal of Agricultural Engineering Research**. The British Society for Research in Agricultural Engineering, by Academic Press, v. 30, p. 373- 380, 1984.

MOISTURE MEASUREMENT - PEANUTS. ASAE Tentative Standard: ASAE S410T **Agricultural Engineers Yearbook**, Published by ASAE, 1982, p. 346 - 347.

NELLIST, M. E. **Developments in continuous flow grain driers**. The Agricultural Engineer, 1982. p. 74 - 80.

OHJA, T. P. Drying of paddy in post-harvest prevention of wast and loss of food grain. **Asian Productivity Organization**, Tokio, 1974. 375 p.

QUEIROZ, D. M. **Simulação de secadores de milho (*Zea mays* L.) em secadores de fluxos concorrentes**. UFV, 1984. 69 P. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1984.

QUEIROZ, D. M. ; PEREIRA, J. A. M. Secagem de grãos a baixa temperatura. **CENTREINAR**, Viçosa - MG, 1982. Datilografado, 30 p.

RIGUETTI, E., QUEIROZ, D. M. Determinação da taxa de combustão e eficiência térmica de uma fornalha a leña. In: XX Congresso de Engenharia Agrícola. Londrina - Pr. 1991. **Anais**. Londrina, SBEA, 1993. P 229 - 243

RIPOLI, T. C., MOLINA JR, W. F., NOGUEIRA, M. C. S., MATOS de, J.R. Equivalente energético do palhico de cana-de-açúcar. In: XIX Congresso de Engenharia Agrícola. Piracicaba, SP, 1990. **Anais**. Piracicaba, SBEA, v. 1, 1990. p. 249 -262.

SABATINI, R. Na ciência nada é relevante. **Jornal da UNICAMP**, Campinas, maio 1993. p. 8.

SANEST. **Sistema de Análise Estatística**. Elio Paulo Zonta e Amauri Almeida machado (Autores), ESALQ - USP.

- SAWAZAKI, E., MORAIS, J. F. L., LAGO, A. A. Influência do tamanho e umidade do grão na expansão da pipoca South American Mushroom. **Bragantia**, Campinas. 1986, n. 45, p. 363-70.
- SILVA, J. S., GOMES, R. A. R., HARA, T. Estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto. **Engenharia na Agricultura**; Série Armazenamento/ Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais - vol. 1, n. 2, 1991. Viçosa: AEAGRI, 1991. 15 p.
- SILVA, J. S., PINTO, F. A. C. Secagem e armazenagem de grãos no Brasil. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus - Bahia, 1993. **Anais**. Ilhéus SBEA, CEPLAC, v. 2, 1993. p.1141 - 1157.
- SILVA, J. S., SOARES, A. G. O., DALPASQUALE, V. A. et al. Secagem de café em secadores de fluxo concorrente. in: ENCONTRO NACIONAL DE SECAGEM, 4, 1983, Viçosa. **Anais**. Centro Nacional de Armazenagem - CENTREINAR, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 144 p. p. 107- 119.
- SILVA, W. J. Estudo amplia pesquisa de milho. **Jornal da UNICAMP**, Campinas, maio, 1993, p. 8
- SOKHANSANJ, S. Grain drying simulation wiht respect to energy conservation and grain quality. In: ARUN, S. Mujandar (ed). **Advances in Drying**. McGill University, Montreal, Canada, 1984. p. 121 - 180.
- TROEGER, J. M., BUTLER, J. L. Drying peanuts with intermittent air flow. **Transactions of the ASAE**, 1980. v. 23, n. 1, p. 197 - 199.
- VALARELLI, I. D. Projeto de uma fornalha a resíduos, de fogo indireto, com trocador de calor concorrente, para secadores de produtos agrícolas. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus, Bahia, 1993. **Anais**. Ilhéus, SBEA, CEPLAC, v. 2, 1993. p. 1198 - 1209.
- VERMA, L. R. Biomass energy for rice drying. BIOMASS. J. COOMBS, D. O. HALL and WAYNE, H. SMITH, **Else Vier Apllied Science**, 1990. v. 23, p. 13 -23.
- WALKER, L. P., BAKKER-ARKEMA, F.W. **Energy efficiency in concurrent - flow rice drying**. St. Joseph, Mi: ASAE, 1978. paper n. 78- 3540, 16 p.
- WHITE, G. M., ROSS, I. J. Discoloration and stress-cracking in white corn as affected by drying temperature and cooling rate. **Transactions of the ASAE**, 15 (3), 1972. p. 504 - 507.
- WHITE, G. M., ROSS, I. J., PONELEIT, C. G. Influence of drying parameters on the expansion volume of popcorn. **Transactios of the ASAE**, St. Joseph, MI. 1980, v. 23, n.5, p. 1272-76.

WHITE, G. M., ROSS, I. J., PONELEIT, C. G. Fully-exposed drying of popcorn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI. 1981, p. 466-68.

WHITE, G. M., ROSS, L. J., PONELEIT, C. G. Stress crack development in popcorn as influenced by drying and rehydration process. **Transactions of the ASAE**, 1982. n. 25, v. 3. p. 768 - 772.

WOODROOF, J.G. **Peanuts, production, processing products**. Avi Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. U.S.A. Third Edition, 1983. 414 p.

XAVIER, J. A., VALARELLI, I. D., PIZA, P. L. B.T. et al. Poder calorífico da casca (concha) da macadamia. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Ilhéus, Bahia, 1993. **Anais**. Ilhéus, SBEA, CEPLAC, v. 2, 1993. p. 1071 - 1079.

YOUNG, J. H., DICKENS, J. W. Evaluation of costs for drying in batch or cross-flow systems. **Transactions fo the ASAE**. 1975. v. 18 (4), p. 734 - 739.

YOUNG, J. H. Energy conservation by partial recirculation of peanut drying air. **Transactions of the ASAE**, 1984. v. 27(3), p. 928 a 983.